



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**ANALÝZA MONITOROVÁNÍ ZEMNÍ HRÁZE VODNÍHO  
DÍLA KAROLINKA**

ANALYSIS OF THE EARTH DAM MONITORING OF THE WATER STRUCTURE KAROLINKA

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Eva Koudelková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.**

**BRNO 2019**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Eva Koudelková
Název	Analýza monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

BERKA, Š. (2010). Elektrotechnická schémata a zapojení 2, BEN - technická literatura, Praha 2010, ISBN 978-80-7300-254-1, str. 228.

BLÁHA, P. a kol. (2003). Karolinka – monitoring 2003. GEOtest, Brno, MS.

ČIŠTÍN, J., HÁLEK, V. (1975). VN na Stanovnici u Karolinky. Filtrační stabilita sypanin. Závěrečná zpráva VVÚVSH VUT v Brně.

FÍNA, D. (2013). Vodní dílo Karolinka je po zásadní rekonstrukci opět plně funkční. Tisková zpráva, <http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/vodni-dilo-karolinka-je-po-zasadni-rekonstrukci-opet-plne-funkcni/>.

FEJFAROVÁ, M. (2014). Možnosti detekce obsahu vody v pórovitém prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie. Disertační práce obor Stavební inženýrství (nD) – Vodní hospodářství a vodní stavby. FAST VUT v Brně.

GERIŠ, R., KOŠOUR, D. (2012). Centrická rozsivka v nádrži Karolinka znamená prvonález v rámci České republiky. Zpravodaj o vodě. 1/2012, p. 11. ISSN 1803-666X.

HODÁK, J. (2010 - 2012). Vývoj nových metod pro zvýšení bezpečnosti přehrad – etapové výzkumné zprávy I – VIII.

KARÁSEK, J. (2012). Hráz přehrady v Karolince obsadili na rok dělníci. In: Deník.cz, dostupné na <http://www.denik.cz/zlinsky-kraj/hraz-prehrady-v-karolince-obsadili-na-rok-delnici-20130105-j9t7.html>

MACÍK, J. (2011). Karolinka. Zpravodaj o vodě. 4/2011, p. 5. ISSN 1803-666X.

PAŘÍLKOVÁ, J., GARDAVSKÁ, Z., FEJFAROVÁ, M., ZACHOVAL, Z., VESELÝ, J., PAVLÍK, I. (2011). Využití metody EIS při monitorování vybraných procesů v půdě. Konference Influence of Anthropogenic Activities on Water Regime of Lowland Territory Physics of Soil Water. ISBN 978-80-89139-26-2.

HODÁK, J. (2017). Dokumentace (podklady a data) z VD TBD.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše podkladů k problematice monitorování zemních přehradních hrází.

Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.

Koncepce a realizace měření na VD Karolinka.

Zpracování vybraných měření v návaznosti na rekonstrukci objektu realizovanou v roce 2013 a dopadem na měřené průtoky.

Dokumentace a vyhodnocení měření.

Předpokládaný rozsah práce do 100 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá analýzou monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka. Již od prvního napuštění hráze byly na vzdušném svahu hráze pozorovány průsaky. Jedním z nejvýraznějších zásahů směřujících k jejich snížení byla instalace těsnicí stěny realizovaná v roce 2013. Od roku 2011 je zemní hráz pilotně monitorována sondami metody elektrické impedanční spektrometrie. Diplomová práce se zabývá zpracováním dat zjištěných uvedenou metodou a srovnáváním stanovené elektrické vodivosti zeminy hráze s daty měřenými na zemní hrázi vodního díla (teplota, úroveň hladiny vody v nádrži, průsak) před a po instalaci těsnicí stěny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vodní nádrž, zemní hráz, voda, elektrická impedanční spektrometrie, rezistance, sonda, průsak

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the analysis of the monitoring of the Karolinka water reservoir earth dam. For the reason of seepage detected on the downstream face of the dam, the water reservoir was operated in a limited regime practically from its beginning. One of the most significant interventions aimed at reducing them was the installation of a sealing wall realized in 2013. Since 2011, the earth dam has been pilot-monitored by probes of the electrical impedance spectrometry method. The thesis deals with the processing of the data obtained by this method and with the comparison of the determined electrical conductivity of the dam soil with the data measured on the earth dam (temperature, water level in the reservoir, seepage) before and after installation of the sealing wall.

## **KEYWORDS**

Water reservoir, earth dam, water, electrical impedance spectrometry, resistance, probe, seepage

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Eva Koudelková *Analýza monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka*. Brno, 2018. 54 s., 27 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Analýza monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7. 1. 2019

---

Bc. Eva Koudelková  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2019

---

Bc. Eva Koudelková  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji především vedoucí mé práce doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za odborné vedení a nezbytné rady při zpracování práce, panu Luboši Pařílkovi za asistenci při měření a pracovníkům Povodí Moravy, s. p. a Vodní díla – TBD a. s. za poskytnutí dat. V neposlední řadě děkuji celé mé rodině za vytvořené stabilní zázemí a podporu v průběhu celého mého studia.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
1.1	Cíl práce.....	10
1.2	Metoda řešení.....	10
<b>2</b>	<b>ZEMNÍ PŘEHRADNÍ HRÁZE .....</b>	<b>11</b>
2.1	Příčný profil zemní hráze a konstrukční prvky .....	11
2.2	Konstrukční materiál .....	12
2.2.1	Zatřídění zemin.....	12
2.2.2	Materiál pro stabilizační část nehomogenní hráze .....	15
2.2.3	Materiály pro těsnění nehomogenní hráze .....	16
2.2.4	Materiály filtrů a drenů.....	16
2.3	Funkční objekty .....	17
2.3.1	Výpusti .....	17
2.3.2	Přelivy .....	18
2.3.3	Odběry .....	18
<b>3</b>	<b>MONITOROVÁNÍ ZEMNÍCH HRÁZÍ .....</b>	<b>19</b>
3.1	Základní metody monitorování zemních hrází .....	19
3.1.1	Měření přetvoření .....	20
3.1.2	Sledování režimu podzemních a průsakových vod.....	21
3.1.3	Sledování vlivů prostředí a provozu .....	22
<b>4</b>	<b>METODA ELEKTRICKÉ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE .....</b>	<b>24</b>
4.1	Princip metody .....	24
4.2	Princip měření.....	26
4.3	Měřicí aparatura.....	26
<b>5</b>	<b>VODNÍ DÍLO KAROLINKA .....</b>	<b>29</b>
5.1	Charakteristika hráze .....	29
5.2	Technické problémy VD Karolinka .....	30
5.3	Rekonstrukce VD Karolinka .....	31
5.3.1	Realizace těsnicí stěny.....	31
5.4	Monitorování zemní hráze Vodního Díla Karolinka .....	31



5.5	Monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka metodou EIS .....	32
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>34</b>
6.1	Průběh elektrické vodivosti změřené sondami EIS .....	34
6.2	Porovnání průběhu elektrické vodivosti zeminy hráze, teploty vody a teploty vzduchu.....	36
6.3	Porovnání průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny vody v nádrži .....	38
6.4	Porovnání průběhu elektrické vodivosti a průsaků .....	40
6.5	Porovnání ploch pod křivkou elektrické vodivosti podle hloubek .....	42
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>48</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>54</b>

# 1 ÚVOD

Člověk vždy potřeboval vodu jako surovinu nezbytnou pro život (pitná voda, chov vodních živočichů, meliorace, rekreace apod.) a energetickou (mlýny, pily, výroba elektrické energie). Proto vodu akumuloval do vodní nádrže. Konstrukce zemních hrází vodních nádrží je možno v současné době nalézt po celém světě.

První historicky doložená zemní hráz byla postavena v Egyptě, a to již před čtyřmi a půl tisíci lety (Smith, 1971), tedy ještě v pravěku. Nádrž zadržovala dešťovou vodu, která byla následně využívána pravděpodobně pro pitné účely. Životnost vodního díla (VD) byla pouze několik let. Podle dostupných nálezů byla destrukce VD způsobena buď přelitím hráze, nebo jako důsledek ve spěchu prováděné stavby.

Obecně lze konstatovat, že nejvýznamnějšími staviteli starověku byli Římané. Obecně hlavním prvkem jejich konstrukcí (včetně vodohospodářských) byl oblouk, který původně převzali z etruské civilizace. Římané jsou známí stavbami cest, mostů a akvaduktů. Stejně schopní byli také v oboru stavby vodních nádrží. Během existence římského impéria postavili velké množství hrází. Pouze tři z nich se nacházely na území dnešní Itálie (Smith, 1971). Všechny tři hráze byly unikátní z toho důvodu, že byly postaveny za účelem čistě rekreačním, což v té době nebylo zvykem. Hráze byly postaveny na řece Anio, na jejímž břehu měl svůj palác císař Nero. Výstavbou přehrad chtěl Nero pouze zvýšit atraktivitu lokace svého sídla. O konstrukci zmíněných tří hrází není dochováno mnoho informací. Největší z nich je však zobrazena na obraze (Obr. 1.1) visícím v sakristii kláštera sv. Benedikta nacházejícího se poblíž. Z malby je zřejmé, že hráz byla zděná se dvěma otvory, umožňujícími odvádět nadbytečný průtok vody do řeky.



**Obr. 1.1 Zobrazení zděné hráze na řece Anio (Smith, 1971)**

Od časů starověkého Říma uplynula dlouhá doba a dnešní konstrukce hrází jsou svými materiály a postupem výstavby na úrovni tehdy nepředstavitelné. Ať už jsou ale jednotlivé

prvky konstrukce jakkoli vyspělé, je naprosto nezbytné věnovat všem stávajícím vodním dílům patřičnou péči, neboť provoz jakéhokoli díla je jen tak bezpečný, jak bezpečný je jeho nejslabší článek. Monitorováním stavu VD se zabývá technickobezpečnostní dohled (TBD), který je v České republice nařízen vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 471/2001 Sb., o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly.

Téma, které jsem zvolila pro svoji diplomovou práci, zní „Analýza monitorování vodního díla Karolinka“. Vodní nádrž monitoruje TBD a na žádost vlastníka je stav konstrukce sledován také sondami umožňujícími měření metodou elektrické impedanční spektrometrie (EIS).

## 1.1 CÍL PRÁCE

Předmětem diplomové práce je provedení analýzy dat získaných monitorováním hráze sondami instalovanými v hrázi a umožňujícími měření metodou EIS a dat získaných při provádění technickobezpečnostního dohledu nad vodním dílem.

VD Karolinka je ve správě Povodí Moravy, s. p., závod Horní Morava. Zajišťovatelem TBD je společnost Vodní díla – TBD a. s. Do jednání jsem vstoupila s Ing. Jiřím Hodákem, Ph.D. z pobočky společnosti Vodní díla – TBD a. s. Brno-Lesná a Ing. Vlastimilem Krejčím z Povodí Moravy, s. p.

Cílem mojí diplomové práce je na základě měřených a převzatých dat posoudit vývoj jednotlivých sledovaných parametrů vzhledem k opravě těsnicího jádra zemní hráze, která proběhla v roce 2013 a na základě výsledků měření usuzovat na bezpečnost provozu VD.

## 1.2 METODA ŘEŠENÍ

Pro měření metodou EIS jsem využila měřicí přístroj Z-metr IV, který byl realizovaný řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA a využívá měřicí metodu EIS. Jedná se o nový přístroj, který byl navržen, realizován a testován v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb (ÚVST) Fakulty stavební jak při měřeních na fyzikálních modelech, tak i v polních podmínkách. Přístroj tvoří základní článek měřicí aparatury sestávající dále z měřicích sond, vodičů, řídicí konzoly a uživatelského programu.

Pro splnění vytyčeného cíle jsem si vymezila provedení následujících činností

- provést rešerši podkladů k problematice monitorování zemních přehradních hrází,
- specifikovat zemní hráz sledované lokality,
- provést rešerši podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie,
- seznámit se s koncepcí a realizací měření na VD Karolinka,
- realizovat měření aparaturou s přístrojem Z-metr IV a zpracovat vybraná měření v návaznosti na rekonstrukci objektu realizovanou v roce 2013 a dopadem na měřené průsaky,
- provést dokumentaci a vyhodnocení měření z let 2017 a 2018.

## 2 ZEMNÍ PŘEHRADNÍ HRÁZE

Těleso hráze může být vybudováno z různých materiálů. Podle druhu materiálu se hráze dělí (Kratochvíl, 1985):

- zemní,
- kamenité,
- zonální kamenité a zemní,
- z lomového zdiva,
- betonové,
- železobetonové,
- z předpjatého betonu.

V minulosti byly realizovány také hráze dřevěné, ojediněle i ocelové. V dnešní době jsou budovány hráze také kombinované. Ve své práci „Analýza monitorování zemní hráze vodního díla Karolinka“ se zabývám daty naměřenými na zemní heterogenní hrázi, proto se následující kapitoly věnují k tomuto typu hráze.

Zemní hráze obecně patří k nejstarším typům vzdouvacích objektů (Broža, 2007). Postup provádění se postupně vyvíjel od ručního sypání homogenních hrází až k výstavbě zonálních zemních hrází a hrází s umělými těsnicími prvky.

Výhodou zemních hrází je možnost využití místních materiálů a velká přizpůsobivost základovým podmínkám v porovnání např. s betonovými přehradami. Zároveň je však nevýhodou velká masivnost konstrukce. K dalším nevýhodám patří nutnost dokonalého zvládnutí režimu vody prosakující tělesem hráze a také relativně malá odolnost proti účinkům vody přelévající korunu. Vše uvedené klade velké nároky na projekční a stavební provedení celé konstrukce.

### 2.1 PŘÍČNÝ PROFIL ZEMNÍ HRÁZE A KONSTRUKČNÍ PRVKY

Konstrukční materiál hráze předurčuje tvar příčného řezu hráze (Broža, 2007). Zpravidla však má těleso tvar lichoběžníku se sklony svahů, které odpovídají materiálovým parametrům konstrukčního materiálu.

Příčný profil přehradního tělesa se skládá ze (Kratochvíl, 1985):

- stabilizační části – zajišťující stabilitu zemní hráze při všech předpokládaných zatěžovacích stavech a přenášející účinky zatížení do podloží a svahů údolí,
- těsnění – zajišťující nepropustnost přehradního tělesa,
- ochranných vrstev – chránících těsnění nebo jiné části přehrady před mechanickým porušením, případně sufozí,
- odvodňovacích prvků – zabezpečujících neškodné odvedení a kontrolu průsaků mimo těleso zemní hráze.

U některých typů zemních hrází plní jeden prvek více funkcí, např. u homogenní hráze plní stabilizační část současně i funkci těsnění, u návodních plášťových těsnění se nenavrhují další opevnění návodního svahu.

## 2.2 KONSTRUKČNÍ MATERIÁL

Konstrukčním materiálem pro výstavbu zemních hrází mohou být různé soudržné i nesoudržné zeminy (Kratochvíl, 1985). Při výběru vhodného materiálu je důležité zvážit, zda je v dané lokalitě dostupný v požadovaném množství a kvalitě. Z toho důvodu je prováděn inženýrsko-geologický průzkum (IGP) a jsou vytipovány potenciálně vhodné materiály. Vhodnost konkrétního materiálu se ověřuje laboratorními a polními zkouškami.

### 2.2.1 Zatřídění zemin

Zatřídění zemin vyplývá z ČSN 75 2310 Sypané hráze. Normu ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže je možné použít pro výběr zemin vhodných k násypu homogenní hráze. Zatřídění zemin je zřejmé z Tab. 2.1., Tab. 2.2, Tab. 2.3, Obr. 2.1 a Obr. 2.2.

Orientační vlastnosti zhutnělých zemin dle klasifikace jsou v Tab. 2.4. Vhodnost jednotlivých zemin pro konkrétní konstrukční část hráze je patrná z Tab. 2.5. Zrnitostní složení a oblasti použitelnosti jsou znázorněny na Obr. 2.3.

**Tab. 2.1 Klasifikace štěrkových zemin (ČSN 75 2410)**

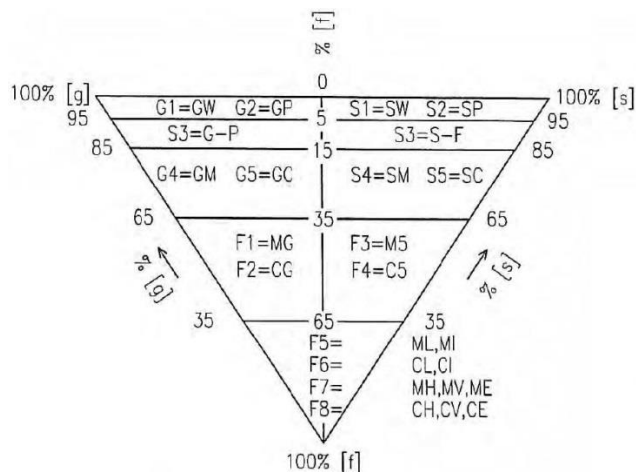
Název zeminy	Symbol	Třída	Kvalitativní znaky			
			Obsah jemnozrnné frakce (<0,06 mm) [%]	$C_u$ [-]	$C_c$ [-]	Diagram plasticity
Štěrky dobře zrněné	GW	G1	<5	>4	1 až 3	-
Štěrky špatně zrněné	GP	G2	<5	<4	<1 nebo >3	-
Štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy	G-F	G3	5 až 15	-	-	-
Štěrky hlinité	GM	G4	15 až 35	-	-	pod čarou A
Štěrky jílovité	GC	G5	15 až 35	-	-	nad čarou A

**Tab. 2.2 Klasifikace písčitých zemin (ČSN 75 2410)**

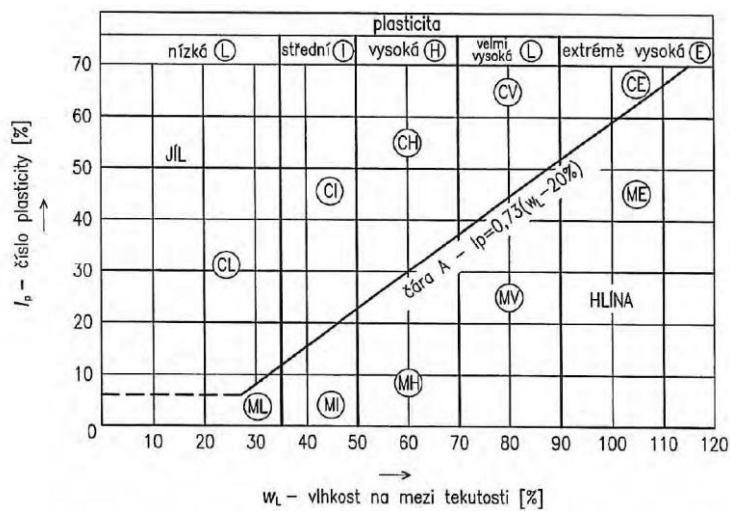
Název zeminy	Symbol	Třída	Kvalitativní znaky			
			Obsah jemnozrné frakce (<0,06 mm) [%]	$C_u$ [-]	$C_c$ [-]	Diagram plasticity
Písek dobře zrněný	SW	S1	<5	>6	1 až 3	-
Písek špatně zrněný	SP	S2	<5	<6	<1 nebo >3	-
Písek s příměsí jemnozrné zeminy	S-F	S3	5 až 15	-	-	-
Písek hlinitý	SM	S4	15 až 35	-	-	pod čarou A
Písek jílovitý	SC	S5	15 až 35	-	-	nad čarou A

**Tab. 2.3 Klasifikace jemnozrných zemin (ČSN 75 2410)**

Název zeminy	Symbol	Třída	Obsah jemnozrné frakce (<0,06 mm) [%]	Poměr štěrkové (g) a písčité (s) frakce	Diagram plasticity (čára A)	$w_L$ [%]
Hlína štěrkovitá	MG	F1	35 až 65	$g > s$	pod A	-
Jíl štěrkovitý	CG	F2	35 až 65	$g > s$	nad A	-
Hlína písčitá	MS	F3	35 až 65	$g < s$	pod A	-
Jíl písčitý	CS	F4	35 až 65	$g < s$	nad A	-
Hlína s nízkou plasticitou	ML	F5	>65	-	pod A	<35
Hlína se střední plasticitou	MI	F5	>65	-	pod A	35 až 50
Jíl s nízkou plasticitou	CL	F6	>65	-	nad A	<35
Jíl se střední plasticitou	CI	F6	>65	-	nad A	35 až 50
Hlína s vysokou plasticitou	MH	F7	>65	-	pod A	50 až 70
Hlína s velmi vysokou plasticitou	MV		>65	-	pod A	70 až 90
Hlína s extrémě vysokou plasticitou	ME	F11	>65	-	pod A	>90
Jíl s vysokou plasticitou	CH	F8	>65	-	nad A	50 až 70
Jíl s velmi vysokou plasticitou	CV	F8	>65	-	nad A	70 až 90
Jíl s extrémě vysokou plasticitou	CE	F8	>65	-	nad A	>90



Obr. 2.1 Klasifikační diagram zemin s částicemi < 60 mm (ČSN 75 2410)



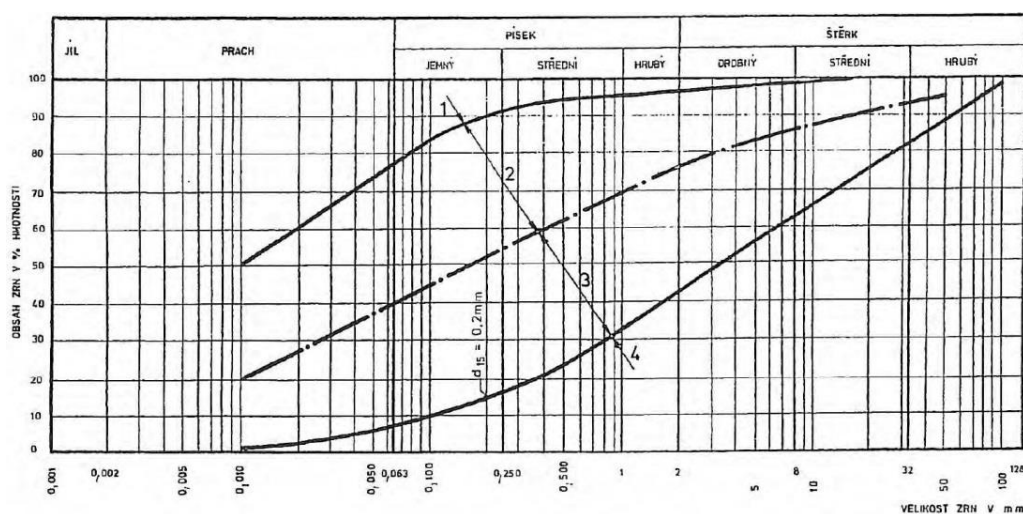
Obr. 2.2 Diagram plasticity (pro částice < 0,5 mm) (ČSN 75 2410)

Tab. 2.4 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází (ČSN 75 2410)

Znak skupiny	Homogenní hráz	Těsnicí část	Stabilizační část
GW	nevhodná	nevhodná	výborná
GP	nevhodná	nevhodná	výborná
G-F	málo vhodná	nevhodná	velmi vhodná
GM	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
GC	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
SW	nevhodná	nevhodná	vhodná
SP	nevhodná	nevhodná	vhodná
S-F	nevhodná	nevhodná	vhodná
SM	vhodná	vhodná	málo vhodná
SC	velmi vhodná	výborná	nevhodná
MG	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
CG	velmi vhodná	výborná	nevhodná
MS	vhodná	vhodná	nevhodná
CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
ML-MI	málo vhodná	vhodná	nevhodná
CL-CI	vhodná	velmi vhodná	nevhodná
MH-ME	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
CH-CE	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná

Tab. 2.5 Orientační fyzikálně mechanické vlastnosti zhuťných zemin (ČSN 75 2410)

Skupina	Standardní Proctorova zkouška		Objemová hmotnost suché zeminy		Smyková pevnost		Filtrací součinitel $k$  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	$\rho_{d \max}$ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	$W_{\text{opt}}$ %	maximální $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	minimální $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	$c_{\text{ef}}$ kPa kPa	$\varphi_{\text{ef}}$ °	
1	2	3	4	5	6	7	8
GW	> 1,91	< 13	1,97 až 2,3	1,58 až 1,9	0	44	$5 \cdot 10^{-4}$ až $7 \cdot 10^{-5}$
GP	> 1,76	< 13	2,1 až 2,3	1,67 až 1,93	0	41	$5 \cdot 10^{-4}$ až $6 \cdot 10^{-5}$
G-F	> 1,74	< 13,5	–	–	0	38	$1 \cdot 10^{-6}$ až $5 \cdot 10^{-6}$
GM	> 1,8	< 20,5	2,06 až 2,16	1,7 až 1,76	5	34	$8 \cdot 10^{-5}$ až $8 \cdot 10^{-10}$
GC	> 1,84	< 17,7	–	–	5	27	$1 \cdot 10^{-4}$ až $1 \cdot 10^{-9}$
SW	1,92 až 2,11	7,4 až 10,8	1,9 až 2,1	1,48 až 1,71	0	41	$5 \cdot 10^{-5}$ až $4 \cdot 10^{-6}$
SP	1,7 až 2,00	8,8 až 12,8	1,73 až 1,96	1,35 až 1,64	0	37	$2 \cdot 10^{-4}$ až $1 \cdot 10^{-6}$
S-F	1,74 až 1,83	11,8 až 14,2	–	–	0	33	$1 \cdot 10^{-5}$ až $1 \cdot 10^{-7}$
SM	1,72 až 2,01	9,1 až 15,9	1,62 až 1,9	1,23 až 1,48	5	34	$1 \cdot 10^{-5}$ až $1 \cdot 10^{-10}$
SC	1,81 až 2,00	10 až 14,7	–	–	6	34	$1 \cdot 10^{-7}$ až $5 \cdot 10^{-10}$
ML	1,49 až 1,82	14 až 25	–	–	5	34	$5 \cdot 10^{-7}$ až $1 \cdot 10^{-10}$
CL	1,66 až 1,84	14 až 19	–	–	5	25	$1 \cdot 10^{-7}$ až $1 \cdot 10^{-10}$
MH	1,33 až 1,4	33 až 35	–	–	5	18	$8 \cdot 10^{-9}$ až $1 \cdot 10^{-10}$
CH	1,42 až 1,63	19,5 až 30,5	–	–	5	17	$4 \cdot 10^{-7}$ až $2 \cdot 10^{-10}$



Obr. 2.3 Mezní křivky zrnitosti zemin vhodných pro konstrukci zemní hráze (ČSN 75 2410)

## 2.2.2 Materiál pro stabilizační část nehomogenní hráze

Pro stabilizační části zemních hrází jsou vhodné materiály, které mají vyšší smykovou pevnost a velkou propustnost (Kratochvíl, 1985). Zároveň musí být tento materiál dobře zpracovatelný (Broža, 2000). Uvedené požadavky vyplývají především z nutnosti zajistit tížný účinek stabilizační části a ochranu a stabilitu těsnicí části. Po dokončení díla může docházet pouze k takovým deformacím, které je schopno zvládnout těsnění a jeho ochranné prvky.



Aplikace materiálů se v konkrétním návrhu posuzuje na základě laboratorních nebo polních zkoušek fyzikálních vlastností. Pro předběžné výpočty lze využít údaje ČSN 75 2410. Čára zrnitosti materiálu vhodného pro stabilizační část nehomogenní hráze by měla ležet v oblasti 4, případně 3 dle Obr. 2.3.

Z materiálů vhodných pro stabilizační části jsou to štěrky, štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy, písky, písky s příměsí jemnozrnné zeminy, sutě, lomový kámen a lomový kámen s hlinitou příměsí. Naopak velmi nevhodné je použití usazených hornin, které při styku s vodou a působením klimatických podmínek mění své vlastnosti a rozbírají, jako jsou jílovce či jílovité břidlice.

### **2.2.3 Materiály pro těsnění nehomogenní hráze**

Pro těsnicí části zemních hrází se používají materiály s malou propustností a menší pevností, které se dají dobře hutnit (Kratochvíl, 1985). Vhodným materiálem pro těsnění jsou jílovité a hlinité písky, jílovité a hlinité štěrky, písčité a šterkovité jíly a hlíny, jíly a hlíny s nízkou až střední plasticitou. Funkci zemního těsnění je nutné zabezpečit soustavou vhodných ochranných prvků – drénů a filtrů.

Ke konstrukci těsnění může být použit také nezemní materiál, a to beton, asfaltobeton nebo plastové fólie (Broža, 2000).

Beton se navrhuje v podobě desek nebo stříkaného betonu. Technologie stříkaného betonu však nedokáže splňovat požadavky na betonovou směs. Běžné betonové desky vytváří příliš mnoho spár. Jako nejvhodnější užití betonu se tedy jeví betonáž desek po spádnicí na návodním svahu hráze bez vodorovných dilatačních a pracovních spár. Vzhledem k velké délce desek je kladen velký důraz na zvládnutí návrhu, přípravy i aplikace betonové směsi. Je nutné zajistit minimalizaci vzniku hydratačního tepla a následného smršťování a dotvarování betonu.

Výhodou asfaltobetonového těsnění je jeho nízká hydraulická vodivost a vysoká plasticita. Nepříznivou vlastností tohoto materiálu je jeho chování za vysokých teplot.

Plastové fólie používané v minulosti podléhaly rychlé degradaci zejména působením ultrafialového záření. Vznikla tedy nutnost fólie chránit před slunečním zářením a klimatickými podmínkami. Z materiálů pro výrobu fólií se nyní v přehradním stavitelství používá především měkčené PVC s výztužnou mřížkou či tkaninou nebo bez nich a tyto materiály mohou být vystaveny i extrémním klimatickým podmínkám.

### **2.2.4 Materiály filtrů a drénů**

Filtry mají za úkol chránit těsnění před namáháním vyvozeným deformacemi stabilizační části, přenášet působící zatížení z těsnění na stabilizační část. Filtry se umísťují také jako ochrana drenážních prvků. Zemní těsnění musí být zároveň chráněno před kontaktní sufozí (Kratochvíl, 1985).

Nejčastěji používaným materiálem pro konstrukci filtrů jsou písky a štěrkopísky vhodného zrnitostního složení (Broža, 2000). Křivky zrnitosti chráněného materiálu a filtru by měly být přibližně rovnoběžné, zejména v oblasti jemnozrnných částic. Dalším materiálem užívaným pro filtrační vrstvy jsou netkané syntetické geotextilie a rovinné nebo prostorové geosítě. Sendviče geotextilií mohou navíc plnit současně funkci filtrační i drenážní. Dlouhodobé použití různých geotextilií v prostředí odpovídajícím poměrům v tělese hráze není však dosud dostatečně prozkoumáno.

Jako drenážní materiál slouží v tělesech zemních hrází velmi hrubý štěrk nebo čistý lomový kámen. Uvnitř drenážního prvku je umístěn trubní materiál, který rychle a bezpečně odvádí vodu zachycenou v drénech. Nejčastěji se navrhuje kameninové nebo plastové trouby.

## 2.3 FUNKČNÍ OBJEKTY

Každá uměle vytvořená vodní nádrž musí být vybavena objekty, které umožňují vodní dílo bezpečně provozovat a využívat (Votruba, 1978). Funkční objekt obsahující alespoň dvě funkční zařízení s různou funkcí se nazývá objekt sdružený. Objekty a zařízení konstrukčně bezprostředně související s přehradním tělesem se souhrnně nazývají příslušenství přehrady (Kratochvíl, 1985).

Funkční objekty lze podle funkce dělit na:

- výpusti,
- přelivy,
- odběry.

### 2.3.1 Výpusti

Dispoziční a hydraulické řešení výpustí závisí na funkcích, které výpusti plní (Kratochvíl, 1985):

- prázdnění nádrže – úplné nebo částečné, v požadovaném čase,
- nalepšování průtoku pod přehradou – vypouštění požadovaných průtoků do toku pod přehradou a to při všech polohách hladiny v nádrži,
- vypouštění neškodného průtoku za povodně,
- převádění průtoků během stavby přehrady,
- převádění průtoků za opravy při prázdné nádrži.

Velmi důležitá je provozní spolehlivost výpustí (Broža, 2000). Proto se navrhuje s padesáti, případně i stoprocentní rezervou.

Podle výškového umístění se výpusti dělí na (Votruba, 1978):

- spodní – jsou umístěny u dna, umožňují plnit většinu z požadovaných funkcí,
- střední – jsou umístěny ve větší výšce nade dnem, mohou plnit jen některé z požadovaných funkcí,

- horní – jsou umístěny v horní části zásobního prostoru a mohou tedy plnit jen některé funkce, např. pojistné zařízení pro převádění povodní.

### 2.3.2 Přelivy

Přeliv plní funkci bezpečného převádění povodňových průtoků z nádrže do toku pod přehradou a tím zabezpečuje přehradní těleso proti přelití (Kratochvíl, 1985). Přelivy mohou být součástí přehrady nebo tvoří samostatný objekt mimo ni.

Přelivy lze rozdělit na dvě velké skupiny (Votruba, 1978):

- nehrazené – jejich průtočnost závisí při daném uspořádání jen na stavu hladiny vody v nádrži, přepad vody není omezován žádnou hradicí konstrukcí,
- hrazené – přepadové množství je regulováno uzávěry, přes které voda může přepadat nebo vytéká pod nimi (odvislé od typu uzávěru).

Z hlediska manipulace (např. regulování povodňového průtoku v reálném čase) je výhodnější hrazený přeliv, z hlediska údržby a náročnosti provozu je jednoznačně výhodnější přeliv nehrazený (Broža, 2000).

Podle dispozičního a konstrukčního uspořádání lze přelivy dělit na:

- korunové – jsou součástí přehrady a voda se jimi převádí přímo přes přehradní těleso a po vzdušném svahu hráze, spíše výjimečně navrhovány u zemních hrází,
- postranní – jsou budovány v břehu bezprostředně vedle přehradního tělesa, kde směr přepadající vody je souběžný se směrem vodního toku,
- boční – uspořádání charakteristické pro vodní díla se zemními hrázemi, voda přepadá převážně kolmo na směr odvádění spadištěm, na které navazuje skluz,
- šachtové – voda přepadá přes půdorysně zakřivenou přelivnou plochu do odpadní šachty a poté do odpadní štol, výhodné je začlenění do sdruženého objektu díla se zemní přehradou.

### 2.3.3 Odběry

Odběrný objekt musí umožňovat odebírání vody z nádrže v požadovaném množství v přiměřené kvalitě a při všech polohách hladiny nad příslušnou minimální provozní hladinou (Kratochvíl, 1985). U sypaných přehrad je výhodné spojení odběrného objektu s objektem výpustí – sdružené objekty.

### 3 MONITOROVÁNÍ ZEMNÍCH HRÁZÍ

Přehrady jako vzdouvací stavby vytváří nádrže, které slouží k akumulaci vody v takovém množství, které by mohlo při porušení konstrukce způsobit škody mnohanásobně překračující hodnotu vlastního díla (Votruba, 1978). Při projektování, výstavbě i během provozu přehrad se uplatňují faktory, které nepříznivě ovlivňují jejich bezpečnou funkci. Patří mezi ně přírodní vlivy, technická náročnost stavby, účinky vody (mechanické, chemické).

K zajištění bezpečnosti slouží zejména četná kontrolní a výzkumná měření a jejich vyhodnocování. Tuto činnost zajišťuje odborný technickobezpečnostní dohled (TBD). Vodní díla podléhající TBD, kritéria a postup jejich zařazení do kategorií, rozsah a četnost provádění dohledu stanoví vyhláška č. 471/2001 Sb. *o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly* (Vyhláška Ministerstva zemědělství, 2001). Metody, rozsah a četnost provádění dohledu jsou dány kategorií určeného VD, etapou provozu VD a typem VD z hlediska provozních a zatěžovacích stavů. Kritéria pro zařazení VD do I. až IV. kategorie jsou patrná z přílohy 1.

Součástí provádění TBD je také návrh případných bezpečnostních opatření. Veškeré cíle TBD lze shrnout v následujících bodech (Lukáč, 2006):

- monitorování vlastností materiálů tělesa hráze a podloží,
- ověřování shody jednotlivých parametrů bezpečnosti ve výpočtových modelech se skutečností,
- identifikování možné anomálie analýzou výsledků a předcházení tak poruchám,
- při použití nových těsnicích materiálů má monitorování také výzkumný charakter.

Ze zkušeností z našeho i světového přehradního stavitelství vyplývá, že koncepčně zpracovaný a odborný technickobezpečnostní dohled umožňuje (Broža, 1987):

- předvídat vznik poruch až v 50 % případů,
- včas odhalit příčiny poruch a navrhnout hospodárnou opravu,
- předejít haváriím a protržení přehrady včasným zavedením nouzových opatření nebo alespoň zabránit ztrátám na lidských životech, pokud je katastrofa neodvratná.

#### 3.1 ZÁKLADNÍ METODY MONITOROVÁNÍ ZEMNÍCH HRÁZÍ

Dohledem sledované jevy lze rozdělit do následujících tří skupin (Broža, 1987):

- měření přetvoření,
- sledování režimu podzemních a průsakových vod a jejich důsledků,
- sledování vlivů prostředí, provozu a jiná měření a pozorování vyplývající z funkce díla nebo z místních podmínek.

### **3.1.1 Měření přetvoření**

Při měření přetvoření jsou sledovány prostorové změny díla jako celku (celkové posuny a pootočení, případně jejich složky), relativní posuny a pootočení jednotlivých částí přehradního tělesa spolu s podložím a poměrná přetvoření (Broža, 1987).

#### **Velmi přesná nivelace**

Metoda velmi přesné nivelace (VPN) je základním prostředkem sledování výškových změn (sedání) všech přehradních staveb. Přesnost této metody dosahuje až 0,2 mm. Při měření se vychází z pevných bodů, které musí být umístěny mimo dosah sedání území způsobeného přetížením přehradní konstrukcí a vodou v nádrži. Často se vychází z bodu poblíž hráze, je však nutné ověřit jeho svislé pohyby vzhledem k základním bodům.

Nejjednodušší je provedení nivelace na koruně přehrady. Niveláčnické body se zakládají již v průběhu výstavby a to při vzdušné i návodní patě. Pokud jsou prováděny rozsáhlé a hluboké výkopy, je vhodné zachytit i případný zdvih terénu, resp. základové spáry.

Výškové změny v hloubce podloží nebo násypu lze měřit v drenážních štolách nebo pomocí hloubkové nivelační značky. Tyč nebo trubka je zakotvena na dně vypaženého vrtu a je vyvedena na přístupnou úroveň, kam je už možné vést nivelaci.

#### **Magnetická sonda**

Měření magnetickou sondou spočívá ve sledování výškové polohy plochých desek (např. z hliníku) uložených v násypu pomocí sondy pracující na principu elektromagnetického rozladění oscilačního obvodu. Sonda je spouštěna do svislé trubky. Poloha zhlaví trubky se poté zjišťuje nivelací.

#### **Trigonometrická metoda**

Trigonometrické měření je nejuniverzálnější metodou sledování vodorovných posunů. Metoda je založena na principu protínání vpřed z pevných pozorovacích bodů. Vodorovná složka posunu se stanoví z rozdílu úhlů mezi směry při základním a kontrolním měření. Obvykle se záměra provádí ze tří bodů, i když pro výpočet posunu stačí dva. Při krátkých vzdálenostech mezi pozorovacími a měřenými body (do 100 až 150 m), při použití velmi přesného úhloměrného stroje a respektování dalších faktorů dosahuje praktická přesnost měření až 1 mm.

#### **Měření záměrnou přímkou**

Vodorovné posuny se sledují také měřením záměrnou přímkou. Používá se především pro měření posunů bodů v koruně hráze. Záměrná přímka je definována pevným pozorovacím bodem a záměrným bodem. Nejčastější je odměřování deviačního úhlu sevřeného mezi směrem na záměrný bod a směrem na kontrolní značky umístěné na koruně přehrady. Přesnost měření dosahuje 0,2 mm.

## **Kyvadla**

Kyvadla umožňují měření relativních vodorovných posunů mezi body ležícími přibližně na svislici (Votruba, 1978). Nejjednodušší uspořádání zařízení se nazývá přímé kyvadlo. Jedná se o těžké závaží zavěšené na dlouhém drátě ve svislé šachtě. Měření výchylky kyvadla ze základní polohy se provádí ve více úrovních a pomocí přesného odečítacího zařízení.

Pokud by šachta byla vyhloubena do podloží až do úrovně nedotčené přetvořením, bylo by možné měřit také posuny absolutní.

V případě pevného bodu na dně šachty a tažení drátu nejprve nahoru a poté přes závěs dolů se zařízení nazývá inverzní kyvadlo. Při tomto provedení není nutná měrná základna v hloubce podloží.

## **Sklonoměr**

Měření náklonu vodorovné roviny se provádí pomocí sklonoměru. Jedná se o velmi přesnou přenosnou libelu, která se osazuje na zabetonované čepy s kulatou hlavičkou umístěné v různých přístupných místech.

## **Teleskopický vodočet**

Sedání zemních hrází se měří teleskopickým vodočtem (Kratochvíl, 1961). Do dna vyvrtaného otvoru se v pevné hornině zabetonuje kovová tyč, na niž se navleče posuvná trubka většího průměru. Trubka je v úrovni základové spáry ukončena deskou, takže se pohybuje společně se sedáním podloží. Měří se stlačení vrstvy zeminy mezi hrází a místem ukotvení pevné kovové tyče. Na pevnou tyč lze nasunout větší počet teleskopických trubek v různých úrovních hráze a získat tak více bodů pro měření sedání vlastní hráze. Přesnost měření se pohybuje kolem 0,5 mm.

## **Fotogrammetrie**

Pozemní fotogrammetrie je vhodná pro globální vyjádření prostorových změn sypaných přehrad (Broža, 1987). Metoda se zabývá přesným měřením na fotografických snímcích (Pavelka, 2003). Přesnost měření se obvykle pohybuje v řádu jednotek centimetrů.

### **3.1.2 Sledování režimu podzemních a průsakových vod**

Sledování režimu průsakových a podzemních vod má zásadní význam pro zjišťování změn technického stavu vodního díla a jeho bezpečnosti (Broža, 1987). Sledování probíhá alespoň v základních projevech kontinuálně, proto může sloužit jako jeden z prvních signálů hrozící poruchy nebo nesprávné funkce konstrukčních prvků. Již ve fázi projektové přípravy je nutné počítat s návrhem sledování průsaků, což by se mělo odrazit ve správném uspořádání těsnicích, filtračních a drenážních prvků.

Drenážní systém musí současně s drenážní funkcí umožňovat kontrolu funkce těsnicích prvků. Důležité je oddělit kontrolu průsaku přehradním tělesem a podložím a zabránit vnikání jiné vody (např. přítok z údolních svahů) do odvodňovacího systému.

Režim průsakových vod ovlivňuje bezpečnost přehradních hrází třemi způsoby:

- účinkem tlaku v pórech materiálu, jímž voda prosakuje,
- vnitřní erozí,
- fyzikálně chemickými účinky.

Základními prostředky sledování účinků průsaků jsou měření množství průsaku (odtoku z odvodňovacího systému), měření pórového tlaku (vztlaku) a měření hladiny vody prosakující porézním prostředím (depresní křivky).

### **Měření průsaků**

Průsaky jsou monitorovány nezávisle na výtocích z jednotlivých větví odvodňovacího systému (Votruba, 1978). Měření probíhá kontinuálně pomocí měrných přelivů nebo periodicky vyčerpáváním stálého objemu jímky prosáklé vody (po naplnění po danou úroveň). Pokud není jiná možnost, lze velikost průsaku odhadovat z měření průtoku v korytě pod vodním dílem.

### **Měření pórových tlaků**

Měření pórových tlaků je základním prostředkem kontroly stability a bezpečnosti zemních přehradních hrází (Broža, 1987). Měření probíhá v těsnicích prvcích, v bezprostředním okolí základové spáry a někdy také v jiných částech konstrukce, případně v podloží. K měření pórových tlaků se používají snímače různé konstrukce. V základové spáře jsou častější piezometrické vrty, kde velikost vztlaku udává hladina vody, která se měří Rangovou píšťalou nebo elektrickou sondou. V případě přetlaku se ústí vrtu uzavře a opatří manometrem.

### **Měření hladiny vody v porézním prostředí**

Piezometrické vrty se v tělesech sypaných hrází používají také k měření polohy depresní křivky (Broža, 1987). Výšky hladiny podzemní vody se zjišťují v tělese zemní hráze i v dotčeném území pro zjištění změn vyvolaných provozem VD (Kratochvíl, 1964). Pro interpretaci výsledků jsou nutné chronologické záznamy polohy hladiny horní a dolní vody, případně i teploty vody v nádrži při různých hloubkách.

### **3.1.3 Sledování vlivů prostředí a provozu**

Vlivy prostředí a provozu působí na konstrukční prvky obvykle velmi pozvolna. Sledování těchto vlivů provádí hrážný a patří mezi běžné kontroly jako součást pravidelné obchůzky. Hrázný také vede záznamy o pozorovaných skutečnostech. Z klimatických jevů se pravidelně vedou záznamy o teplotě ovzduší a vody v nádrži, srážkách, výšce sněhové pokrývky, tloušťce ledové celiny. Na stabilitu a správnou funkci VD mají vliv také změny

úroveň hladiny vody v nádrži, plné zatížení při povodních a splaveniny přinášené do nádrže. Důležité je také monitorování seizmicity, k němuž lze přiřadit vlivy odstřelů při stavebních a těžebních pracích, chvění přenášené z budovy elektrárny nebo vozovky, nárazy plavidel a jiné.



## 4 METODA ELEKTRICKÉ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

EIS je nepřímá odporová elektromagnetická metoda, která umožňuje sledovat změny obsahu vody, vlhkosti, teploty, struktury, ulehlosti, napjatosti či jiných parametrů v zeminách.

Využití EIS k účelům monitorování zemních hrází je v ČR a v Evropě obecně spíše unikátní, jelikož zde převládá používání přístrojů pracujících na principu buzení elektrického pole stejnosměrným signálem. Střídavé odporové metody jsou však rozšířeny zejména v USA (Telford, 1990).

Pro měření elektrické impedance pórovitých materiálů byly v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb řešením projektů Grantové agentury ČR a mezinárodních projektů programu EUREKA sestrojeny měřicí přístroje Z-metr první až čtvrté generace s příslušenstvím. Při monitorování zemní hráze VD Karolinka byl použit přístroj Z-metr III a Z-metr IV.

### 4.1 PRINCIP METODY

Základním principem metody EIS je měření frekvenční charakteristiky elektrické impedance  $\mathbf{Z}$  sledované zeminy v komplexním tvaru, tj. závislost rezistance  $R$  a reaktance  $X$  resp. modulu impedance  $|Z|$  a fázového úhlu  $\varphi$  zeminy na frekvenci napájecího signálu. Reálnou složku představuje rezistance  $R$  resp. její převrácená hodnota, elektrická vodivost  $G$ , která charakterizuje např. obsah vody v zemině, fázové rozhraní voda – dno nádrže nebo na základě identifikace rozdílných elektrických vodivostí mapuje vrstevnatost dna nádrže. Reaktance  $X$ , imaginární složka měřené elektrické impedance, je v elektrických obvodech reprezentována kondenzátorem, jehož kapacita charakterizuje zeminu a prostřednictvím měřicí frekvence umožňuje její bližší popis.

Kmitočtovou charakteristiku elektrické impedance  $\mathbf{Z}$  lze vyjádřit jako

$$Z(j\omega) = R + j\omega X, \quad (4.1)$$

nebo lze zapsat fázor elektrické impedance  $\mathbf{Z}$  v algebraickém (složkovém) tvaru

$$\mathbf{Z} = R + jX, \quad (4.2)$$

kde  $R$  je reálná část elektrické impedance tj. v ideálním případě kmitočtově nezávislý odpor  $[\Omega]$ ,  $X$  je imaginární část elektrické impedance, tj. kmitočtově závislá reaktance  $[\Omega]$  a  $\omega$  je úhlový kmitočet  $[\text{rad/s}]$ , pro který platí

$$\omega = 2\pi f, \quad (4.3)$$

kde  $f$   $[\text{Hz}]$  je kmitočet budicího střídavého harmonického signálu, jehož prostřednictvím lze např. odhadnout velikost efektivního zrna matrice zeminy a případně ojedinělých zrn příměsí.

Pro názornější představu lze elektrickou impedanci považovat za dvojpól obsahující rezistory a akumulační prvky, které popisují odpor zeminy a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence. Podobně jako elektrický odpor charakterizuje vlastnosti zeminy pro stejnosměrný proud, elektrická impedance charakterizuje vlastnosti zeminy pro střídavý proud.

Elektrická vodivost zeminy může být způsobena pohybem elektronů nebo pohybem difundujících iontů. Lze konstatovat, že suchá nebo zmrzlá zemina je špatným elektrickým vodičem, zatímco zemina s obsahem vody je vodičem elektrického proudu. Proto se voda, obsahující určité množství rozpuštěných minerálních solí, z pohledu elektrotechniky řadí mezi vodiče. Je charakteristická svým elektrickým odporem  $R$  [ $\Omega$ ] (reálná část elektrické impedance  $\mathbf{Z}$ ) resp. jeho převrácenou hodnotou elektrickou vodivostí  $G$  [S].

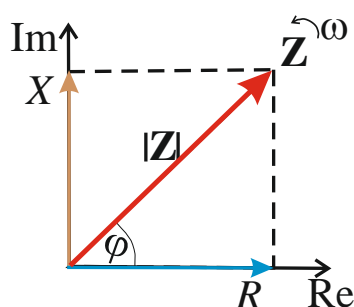
$$G = \frac{1}{R} \quad (4.4)$$

Kmitočtová charakteristika je dána dvěma závislostmi patrnými z Obr. 4.1 - amplitudovou, kde modul vektoru impedance  $|Z|$  je vyjádřen z Pythagorovy věty

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (4.5)$$

a fázovou, kde fázový posuv je vyjádřen vztahem

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right). \quad (4.6)$$



**Obr. 4.1 Znázornění fázoru elektrické impedance**

Ve vodním hospodářství je často sledovanou charakteristickou veličinou, popisující vlastnost zeminy resp. vody, konduktivita  $\sigma$  [S/m]

$$\sigma = G \cdot \frac{l}{A} \quad (4.7)$$

resp. její inverzní hodnota rezistivita  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]

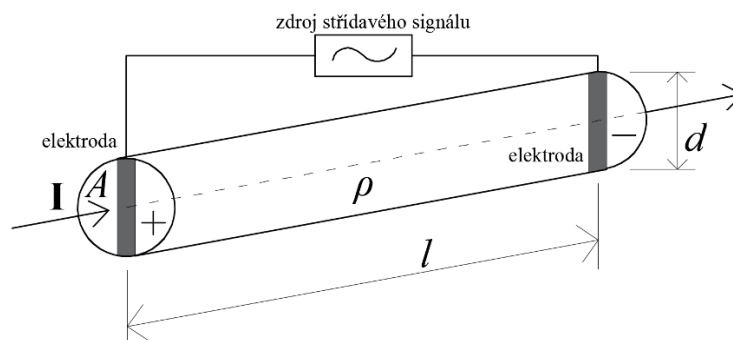
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R \cdot \frac{A}{l}, \quad (4.8)$$

kde  $A$  [ $m^2$ ] je kolmý průřez vodiče reprezentovaného zkoumanou zeminou resp. vodou a  $l$  [m] je jeho délka.

## 4.2 PRINCIP MĚŘENÍ

Měření elektrické impedance  $Z$  zeminy vychází z paralelního umístění dvou elektricky vodivých elektrod do zeminy ve vzdálenosti  $l \leq 2$  m. Maximální vzdálenost je doporučena z důvodu omezení vlivu geoelektromagnetického pole Země, vždy však vychází z podmínek na lokalitě. Dvě elektrody délky  $d$  tvoří jeden snímač sondy EIS. Střídavý elektrický proud procházející zeminou mezi elektrodami v ní generuje elektrické pole, kolmo na něj je generováno pole magnetické. Zemina však průchodu elektrického proudu klade elektrický odpor, což vyjadřují měřené složky elektrické impedance  $Z$  – rezistance  $R$  a reaktance  $X$ . Stává se tak elektrickým vodičem délky  $l$ , jehož plocha  $A$  je určena délkou elektrod  $d$  (Obr. 4.2).

Při využití přístroje Z-metr IV je monitorování možno realizovat jako paralelní zapojení dvou elektrod (Obr. 4.2), nebo na jedné dělené trubicové sondě, kdy je nezbytné využití adaptéru.



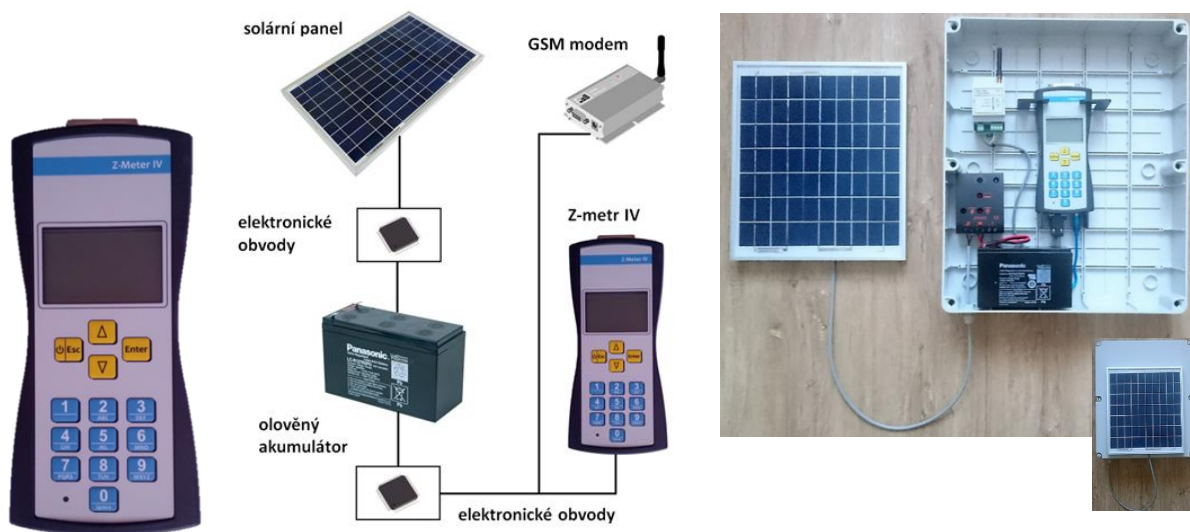
Obr. 4.2 Princip měření elektrické impedance zeminy

## 4.3 MĚŘICÍ APARATURA

Přístroj Z-metr IV (Obr. 4.3) byl navržen a realizován pro měření elektrické impedance v rámci projektů programu EUREKA (Pařílková, 2013). Jádrem Z-metru IV je tvořeno 32 bitovým výkonným mikroprocesorem s jádrem Cortex-M3 (Pařílková a Radkovský, 2016). Mikroprocesor pracuje na frekvenci 120 MHz a má kapacitu 1 MB paměti flash a 128 kB paměti RAM. Zdrojem energie jsou dva dobíjecí průmyslové akumulátory typu Li-Ion. Kapacita baterie je dostatečná pro 16-hodinový intenzivní provoz. Dobíjení probíhá pomocí 5V/1A napájecího adaptéru ze sítě, přes USB port z jakéhokoli jiného zdroje (např. PC, powerbanka apod.), olověné záložní baterie či obvodu se solárním panelem. Pro komunikaci s uživatelem je přístroj vybaven LCD a klávesnicí, z níž je možné provádět nastavení přístroje, a to včetně dlouhodobého automatického autonomního provozu (Obr. 4.3).

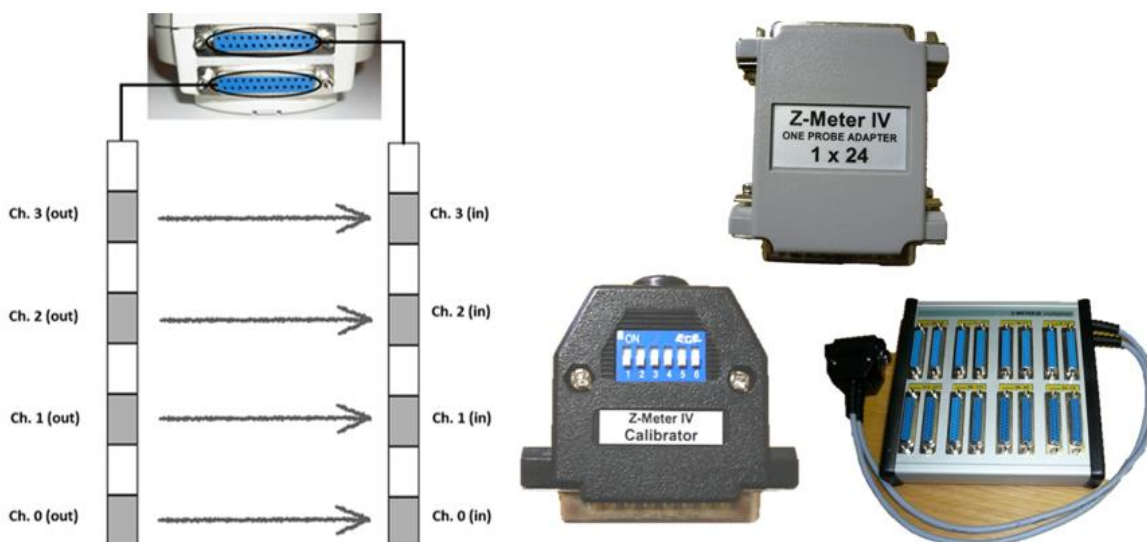
Hlavním rozhraním je rozhraní Bluetooth, které umožňuje propojení přístroje k ovládání a manipulaci s daty. Přístroj je stavěn pro GSM komunikaci (Globální Systém pro Mobilní komunikaci) s bezdrátovým připojením prostřednictvím Wi-Fi modulů. Naměřená data jsou ukládána na SD kartu, která není uživatelsky vyměnitelná, ve formátu \*.csv a přístup k nim je

umožněn propojením s počítačem pomocí USB kabelu nebo přes Bluetooth. Zpracování dat se zpravidla realizuje v programu MS Excel.



Obr. 4.3 Přístroj Z-metr IV

Na těle Z-metru IV se nachází dva 25 pinové konektory typu CANON, které slouží k připojení budicích/měřicích snímačů. Číslování snímačů na sondě je vždy takové, že snímač s číslem „0“ je umístěn nejhluběji pod povrchem (Obr. 4.4). Součástí přístrojového vybavení je dále adaptér „one probe“ pro měření na jedné trubicové sondě, kalibrátor a dle zakoupeného počtu měřicích míst externí přepínač pro max. 256 měřicích kanálů (na Obr. 4.4 značených „Ch“).



Obr. 4.4 Schéma připojení sondy a příslušenství přístroje

Specifikace základních parametrů přístroje Z-metr IV je zřejmá z Tab. 4.1 (Pařílková a Radkovský, 2016).

Tab. 4.1 Základní parametry přístroje Z-metr IV

<b>specifikace elektrické měřicí části</b>	
měřicí rozsah impedance	10 $\Omega$ – 1 M $\Omega$
měřicí frekvence	100 Hz – 200 kHz
přesnost modulu Z	$\pm 2\%$ z rozsahu
přesnost fáze	$\pm 2^\circ$
měřicí napětí sinusové s nulovou střední hodnotou	
amplituda měřicího napětí	0,2 V; 1,0 V
interní přepínač	až 16 kanálů
externí přepínač	až 256 kanálů
dlouhodobé měření na jedné lokalitě	maximální vzdálenost mezi sondami a měřicí jednotkou až 60 m (při použití tzv. aktivních sond)
měřicí funkce	bez záznamu dat, manuální ovládání, automatické ovládání
volitelné automatické spouštění – vestavěnou klávesnicí nebo externě z mobilní aplikace	
možnost připojit sadu čidel pro měření teplot	
<b>specifikace komunikace s okolím</b>	
základní komunikační rozhraní	USB 2.0, SD karta, Bluetooth
výstupní formát datového souboru	standardní "*.csv"
možnost připojit GSM modem pro dálkový přenos dat a dálkové ovládání přístroje	
možnost připojit a zpracovávat i další zákaznická čidla (po úpravě HW a SW přístroje) - nutno konzultovat (např. snímač výšky hladiny)	
<b>napájení</b>	
napájení	bateriové s dobíjecími články
doba kontinuálního provozu [h]	16
napájecí napětí [V]	3,7
maximální napájecí napětí [V]	5

## 5 VODNÍ DÍLO KAROLINKA

Vodní dílo Karolinka je situováno v ř. km 0,75 vodního toku Stanovnice [1]. Nádrž byla vybudována za účelem zásobování oblasti Vsetínska a jeho okolí pitnou vodou.

Nádrž zajišťuje minimální průtok pod hrází, slouží k částečné ochraně před povodněmi a od roku 1995 má také energetické využití. Objem nádrže činí 7,40 mil. m<sup>3</sup>, průměrné množství dodávky surové vody je 0,25 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, pod nádrží je zajištěn minimální průtok 0,03 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

Zemní hráz délky 391,5 m v koruně převyšuje okolní terén o 35,5 m. Z důvodu vodárenského využití byla v okolí nádrže vyhlášena pásma hygienické ochrany. Provozovatelem VD je společnost Povodí Moravy, s.p. a vykonavatelem technickobezpečnostního dozoru je společnost VODNÍ DÍLA – TBD, a.s. [2].

### 5.1 CHARAKTERISTIKA HRÁZE

Na VD Karolinka je vybudovaná nehomogenní zemní hráz sypaná, pro jejíž konstrukci byl použit místní štěrkový materiál, se středním hlinitým těsněním [2]. Těsnění je napojeno na betonovou injekční štolu vedenou osou hráze [1]. Pod tělesem hráze byla provedena injekční clona.

Sklon návodního svahu je 1:3,25, sklon vzdušního svahu je 1:2,5 [2]. Na vzdušném svahu hráze byly vytvořeny dvě bermy na kótách 500,23 m n. m. a 512,12 m n. m. Kóta koruny hráze je 522,70 m n. m. [2]. Na koruně hráze byla vybudována vozovka. Koruna je na návodní straně opatřena betonovou zídkou plnící funkci zábradlí a vlnolamu. Návodní svah hráze je opevněn hrubým štěrkem částečně prolitým živичným materiálem, vzdušní svah je zatravněn.

Součástí vodního díla je sdružený kruhový objekt věžového typu, který spojuje výpustné a odběrné zařízení [1]. Samotné vypouštění zajišťují dvě spodní výpusti průměru 0,8 m a délky 208 m vedoucí do strojovny kuželových regulačních uzávěrů na vzdušní straně hráze. Věž zprostředkovává odběr vody ve třech výškových úrovních. Odběrné potrubí má v hrázi profil 0,8 m. V blízkosti věže se nachází bezpečnostní objekt. Jedná se o šachtový přeliv kruhového průřezu.

Stavba VD Karolinka byla povolena roku 1976 Krajským národním výborem v Ostravě [1]. Výstavba hráze začala v červnu 1977, celé dílo bylo do trvalého provozu uvedeno v roce 1987.

Materiál byl ukládán v jednotlivých zónách tak, že úzké těsnicí jádro je z obou stran obklopeno štěrky pocházejícími z údolí řeky Stanovnice a Bečvy [2]. Zeminy, které byly těženy pod hladinou podzemní vody, bylo třeba ukládat na dočasné skládky, aby bylo dosaženo vlhkosti přijatelné pro uložení do hráze (Jareš, 2015). Materiál jádra tvoří svahové hlíny těžené u obce Huslenky nedaleko lokality [2].

Základová spára hráze je odvodňována oboustranným plošným drénem tl. 0,6 m. V pravobřežním a levobřežním závázání plní funkci filtru textilie Netex.

V době výstavby se TBD zaměřoval zvláště na měření pórových tlaků v těsnicí části hráze a zahlinění stabilizační části [2]. Měřeny byly také deformace hráze a podloží objektů a úroveň hladiny podzemní vody.

## 5.2 TECHNICKÉ PROBLÉMY VD KAROLINKA

Již při prvním napouštění nádrže se objevily viditelné průsaky na vzdušném svahu hráze. Stalo se tak v únoru 1986, kdy hladina vody v nádrži byla 2,39 m pod hranou bezpečnostního přelivu [2]. Jedním z faktorů způsobujících zmíněné průsaky bylo zřejmě nedodržení technologického postupu v průběhu výstavby. Cesty průsaků pravděpodobně souvisí se způsobem navážení a hutnění materiálů těsnicího jádra.

Horní úroveň těsnicího jádra je 1,3 m pod úrovní koruny hráze, což je o 0,8 m níže, než byla původně projektovaná. Není tedy zajištěno navrhované převýšení těsnicího jádra nad maximální úroveň hladiny vody v nádrži. Z laboratorních zkoušek realizovaných v rámci geotechnických průzkumů je také zřejmé, že zeminy použité ke konstrukci těsnicího jádra mají různou škálu zrnitostí, což může za nepříznivých podmínek umožnit vznik průsakových cest z návodní strany hráze přes těsnicí jádro.

Byla také zjištěna nedostatečná propustnost použitých šterkopísků z oblasti Nového Hrozenkova tvořících zónu při vzdušném svahu hráze. Tato zóna je nasypána z různorodých vrstev, které se odlišují především obsahem prachových částic, které měly být u tohoto materiálu pod 4 %. Podle výsledků průzkumů dosahuje obsah prachových částic v této zóně až 11%. Obsah prachových částic zásadně ovlivňuje propustnost materiálu. Po nepropustných vrstvách voda vytékala na vzdušní svah hráze, kde se objevily výronové plochy. Při vydatných srážkách a vysoké úrovni hladiny vody v nádrži docházelo k sufozi v oblastech se zvýšenou propustností a tím k postupnému zvyšování průsaku. Zjištěné poznatky svědčily o ohrožení jak filtrační stability, tak stability svahu [2].

Z těchto důvodů byl provoz vodního díla již od prvního napouštění omezen a nádrž nebyla do roku 2013, kdy proběhla rekonstrukce těsnicího jádra zemní hráze, nikdy plně napuštěna. Nejvyšší poloha hladiny vody byla roku 1997, a to 370 mm nad hranou bezpečnostního přelivu a 840 mm pod maximální hladinou vody v nádrži. Od prvního napuštění v únoru 1986 bylo vodní dílo provozováno v omezeném režimu. Od roku 1998 bylo dílo provozuschopné pro nejvyšší hladinu 1,3 m pod kótou zásobního prostoru (Hodák, 2014), nebylo tedy možné plně využívat zásobní prostor pro odběry vody a pro ochranu před povodněmi.

## 5.3 REKONSTRUKCE VD KAROLINKA

Rekonstrukce vodního díla Karolinka probíhala v od října 2012 do září 2013 [2]. Spočívala především v realizaci podzemní těsnicí stěny v jádru hráze, dále pak ve zkapacitnění odpadní štolý od šachtového přelivu, odstranění propustku pod hrází a v doplnění monitoringu TBD.

Cílem rekonstrukce bylo zajistit problematickou filtrační stabilitu náspu hráze a zabezpečení díla proti přelití při průchodu desetitisícileté kontrolní povodňové vlny (KPV10000). Během rekonstrukce byla voda v nádrži snížena o 8,5 m proti původnímu stavu, tedy na zásobní objem 2 169 566 m<sup>3</sup>.

### 5.3.1 Realizace těsnicí stěny

Těsnicí stěna byla navržena jako klasická kopaná podzemní clona v horní části těsnicího jádra hráze [2]. Její rozsah byl určen na základě provedených geotechnických průzkumů s ohledem na měřené průsaky při různých stavech hladiny vody v nádrži. Těsnicí stěna byla navržena po celé délce hráze. Těsnicí stěna byla prováděna v červnu 2013 (Hodák, 2014). Napojení na zavázání bylo provedeno tryskovou injektáží na přelomu července a srpna.

Celková délka stěny od zavázání na injekční štolu je 355,0 m a hloubka je proměnlivá – od 10,5 m po 19,3 m. Tloušťka stěny je na základě doporučení Slovenské technické univerzity Bratislava 0,6 m. Celková plocha těsnicí stěny je 4777,0 m<sup>2</sup>.

Materiálem pro vytvoření těsnicí stěny byla cemento-bentonitová samotvrdnoucí suspenze. Stěna byla hloubena z koruny hráze. Umístění stěny v tělese hráze je znázorněno na Obr. 5.2.

Ověřovací provoz byl na díle zahájen v září 2013. Účelem ověřovacího provozu bylo prověřit bezpečnost díla resp. ověření funkce provedené těsnicí stěny v těsnicím jádře hráze. V průběhu ověřovacího provozu přehrady Karolinka byla nádrž ve 4 etapách řízeně postupně naplněna ze snížené hladiny až na úroveň bezpečnostního přelivu. Hladina úrovně vody v nádrži byla udržována na dané úrovni v každé z etap po dobu dvou týdnů.

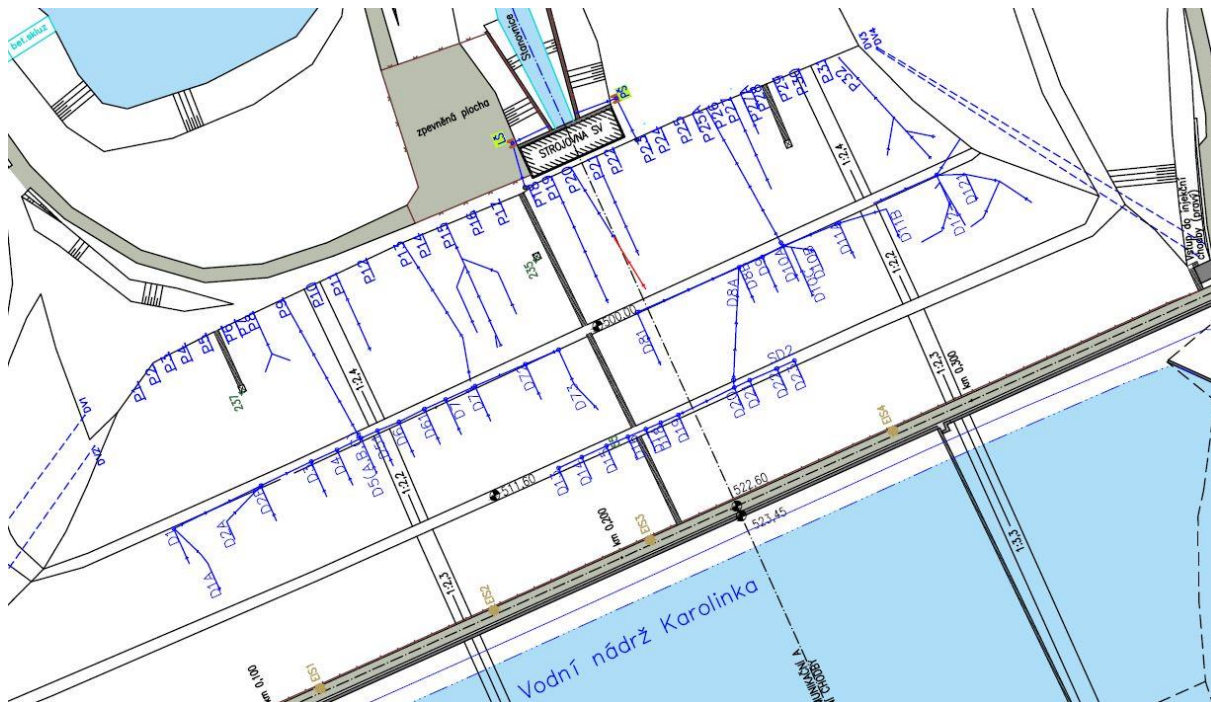
## 5.4 MONITOROVÁNÍ ZEMNÍ HRÁZE VODNÍHO DÍLA KAROLINKA

V červenci 1987 bylo provedeno 5 svislých drenážních vrtů na horní bermě, které slouží k měření hladiny vody v násypu hráze, o rok později drenážní vrty délky 85 m až 105 m se sklonem 10° až 15° na levém a pravém břehu [2]. Tyto vrty měly odvádět případné průsakové vody od levého a pravého zavázání. Mezi lety 1990 a 2003 byla na vzdušném svahu hráze prováděna drenážní pera přerušující nepropustné vrstvy. Každé provedení drenážních per způsobilo změnu průsakového režimu ve vzdušní stabilizační části zemní hráze.

Na horní bermě bylo vybudováno celkem 11 drenážních per, 15 drenážních per na levé části dolní bermy a 11 per na pravé části dolní bermy. Bylo zjištěno, že průsaky jsou značně závislé



na srážkách a poloze hladiny vody v nádrži a teplota vody poukazovala na prosáklou vodu z horní části nádrže.

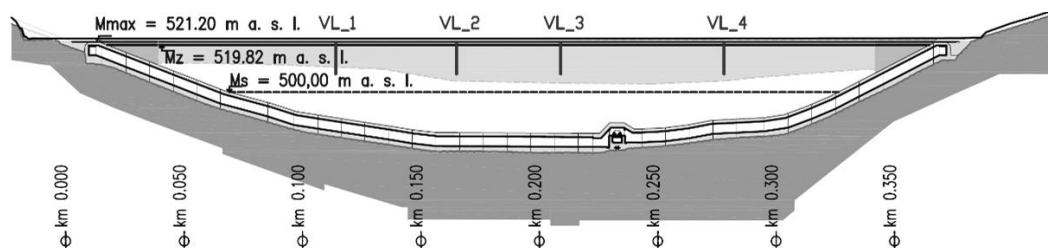


Obr. 5.1 Zakreslení sond EIS a drenážních per v situaci [2]

V květnu 2004 bylo v rámci geotechnického průzkumu v koruně hráze provedeno 8 vrtů a do každého byl osazen snímač pórových tlaků, napojený do automatického sběru dat [2]. Také byla provedena statická penetrace v pěti sondách do hloubky 16 m. Roku 2012 realizovala společnost GEOtest a. s. 4 vrty hloubky 20 m z koruny hráze do vzdušní části těsnicího jádra [2], které byly osazeny snímači pórových tlaků. Současně byly prováděny testy penetrace Marchettiho dilatometrem z koruny hráze do zemin těsnicího jádra.

## 5.5 MONITOROVÁNÍ ZEMNÍ HRÁZE VODNÍHO DÍLA KAROLINKA METODOU EIS

V březnu 2011 byly na vzdušní stranu zemní hráze do těsnicího jádra z koruny instalovány 4 tyčové sondy pro monitorování metodou EIS (Hodák, 2014). Sondy jsou označeny jako VL\_1, VL\_2, VL\_3, VL\_4 a každá sahá do hloubky 13,0 m. Umístění sond v podélném profilu hráze je znázorněno na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Podélný řez hrází se zakreslením těsnicí stěny a sond EIS (Pařílková, 2017)

Sondy byly instalovány pomocí soupravy statické penetrace [2]. Penetrační tyče byly upraveny a do hráze jimi byly vytvořeny vertikální otvory, do kterých byly následně instalovány sondy pro měření metodou EIS. Sondy jsou realizovány jako dělené a jsou osazeny snímači ve třísvorkovém zapojení.

Vodivá část sondy je tvořena nerezovou trubkou o průměru 0,025 m a délce 0,050 m (Pařílková, 2014), nevodivou část tvoří v nepravidelných délkách od 0,050 m do 1,000 m polyamidová trubka se shodným vnějším průměrem (Obr. 5.3).



**Obr. 5.3 Pozice snímačů na tyčové sondě (Pařílková, 2014)**

Poloha sond, délka měřicích elektrod a poloha snímačů na sondě vychází z polohy pozorovaných výronů vody na vzdušném svahu hráze, znalosti charakteristik materiálů použitých na konstrukci zemní hráze a technické dokumentace stavby hráze [2]. Třísvorkové zapojení snímačů na sondě využitě pro měření vyžaduje aplikaci adaptéru Z-meter IV one probe adapter 1 × 24 (Obr. 4.4). Instalace a provedení navazujících prací byla realizována firmou *GEOTest*, a. s. a Vysokým učením technickým v Brně, Fakultou stavební (Pařílková, 2014).

Dne 2. 5. 2013 došlo při rekonstrukci hráze ke zničení sondy VL\_1 (Pařílková, 2014). Na základě jednání se zástupci zúčastněných stran bylo dohodnuto řešit vzniklou situaci výrobou a instalací nové sondy stejné konstrukce a uspořádání měřicích snímačů. Nová měřicí sonda byla rovněž vyrobena na pracovišti LVV ÚVST a instalována dne 18. 9. 2013 společností *GEOTest*, a.s. ve vzdálenosti cca 1 m od polohy původní sondy směrem do středu hráze. Při instalaci bylo zřejmé, že v hloubce 9 m byla v zemině voda.

S ohledem na charakteristiky zeminy je sledování realizováno při frekvenci  $f = 8000$  Hz s dobou přepínání mezi měřeními  $t = 0,100$  s. Počet opakování na jednu snímači  $n = 10$ . Měření bylo do roku 2016 až na výjimečné případy prováděno jedenkrát měsíčně, případně bylo doplněno měřením při mimořádných situacích (velká intenzita srážek, nárůst nebo pokles vody v nádrži, mráz, apod.) [2]. V roce 2017 byl dohodou s podnikem Povodí Moravy, s. p. počet měření upraven na šest za jeden kalendářní rok. Pro rok 2018 byla dohodnuta čtyři měření vždy koncem třetího měsíce v kvartálu s ohledem na další měření prováděná v rámci technickobezpečnostního dohledu. Uvedené schéma se předpokládá do roku 2022 včetně.

## 6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření sondami EIS jsou vyhodnocena a srovnávána na základě naměřené reálné složky elektrické impedance, tj. rezistance zeminy  $R$ . Jednotlivé měsíce jsou ve sledovaném časovém úseku porovnávány prostřednictvím elektrické vodivosti  $G$ , tedy inverzní hodnoty rezistance  $R$  (vztah 4.4). Elektrická vodivost byla pro vyhodnocení zvolena pro svou návaznost na stupeň nasycení prostředí vodou. Lze konstatovat, že čím vyšší je hodnota elektrické vodivosti  $G$ , tím vyšší je obsah vody v zemině za předpokladu především chemicky stejných charakteristik vody i prostředí.

Měření probíhalo až na výjimky jednou měsíčně od března roku 2011 do prosince roku 2016. Během roku 2013 proběhla rekonstrukce VD a lze konstatovat, že data nemají požadovanou vypovídací hodnotu, pro vyhodnocení tedy nejsou zahrnuta. V průběhu rekonstrukce došlo k poškození sondy VL\_1, musela proto být osazena nová o 1 m blíž k VL\_2. Hodnoty naměřené sondou VL\_1 v roce 2014 mohou být uvedenou skutečností poznamenány. V průběhu roku 2017 bylo provedeno šest měření.

V roce 2018 byla provedena čtyři měření rovnoměrně v průběhu roku – v měsících březnu, červnu, září a prosinci. Z toho důvodu porovnávám data z předchozích let naměřená právě v těchto měsících. V případě chybějících měření jsem použila údaje naměřené v nejbližších měsících. Jedná se o září v letech 2014, 2016 a 2017. V uvedených letech jsem pro vyhodnocení použila hodnoty určené z měření v daném roce v měsíci říjnu.

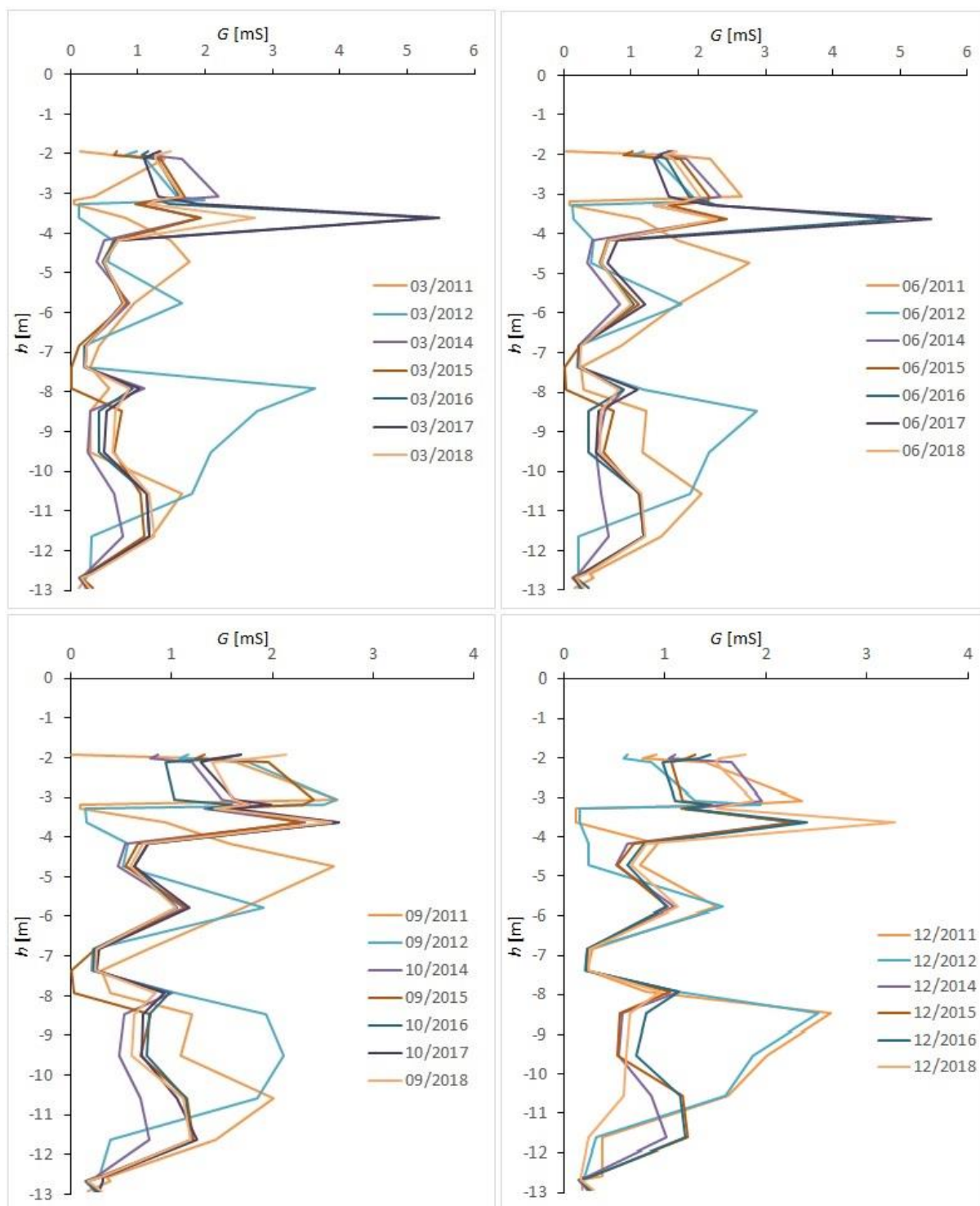
### 6.1 PRŮBĚH ELEKTRICKÉ VODIVOSTI ZMĚŘENÉ SONdami EIS

Grafické znázornění průběhu elektrické vodivosti dává dobrou představu o změně elektrické vodivosti v daném měsíci v jednotlivých letech. Na vodorovné ose grafů (Obr. 6.1) je uvedena hodnota elektrické vodivosti  $G$  určená z měření, na svislé ose je hloubka vyhodnocovaných bodů pod korunou hráze. Za předpokladu nezměněných charakteristik zeminy a vody lze konstatovat, že čím vyšší je hodnota elektrické vodivosti zeminy, tím vyšší je stupeň nasycení zeminy vodou.

Srovnávány jsou roky 2011, 2012, tedy před instalací těsnicí stěny v roce 2013, a 2014 až 2018, po rekonstrukci a instalaci těsnicí stěny.

Ze všech čtyř instalovaných sond je na sondě VL\_4 nejpatrnější vliv instalované těsnicí stěny v průběhu celého roku. Změna elektrické vodivosti je zřejmá v hloubce -8,5 m – -10,6 m. Ve všech porovnávaných měsících, s výjimkou března 2011, došlo po roce 2013 k poklesu elektrické vodivosti. Podobně došlo k výraznému poklesu elektrické vodivosti také v hloubce -5,5 m – -6,5 m, a to ve všech porovnávaných měsících.

Hodnota elektrické vodivosti naopak vzrostla v hloubce -3,2 m – -3,7 m. Ačkoli se na ostatních sondách hodnoty elektrické vodivosti pohybují v jiných intervalech, i tam lze ve zmíněné hloubce sledovat nárůst hodnot  $G$  po provedení těsnicí stěny.



Obr. 6.1 Grafy průběhů elektrické vodivosti na sondě VL\_4

Grafy zobrazující průběh elektrické vodivosti na sondách VL\_1, VL\_2 a VL\_3 jsou v Příloze 2. Je vhodné zmínit pozvolný nárůst hodnot  $G$  v hloubkách blízkých -13 m, který je po instalaci těsnicí stěny významnější. Uvedená skutečnost naznačuje podtékání těsnicí stěny a je nejpatrnější v oblastech sond VL\_1 a VL\_2 ve všech porovnávaných měsících.

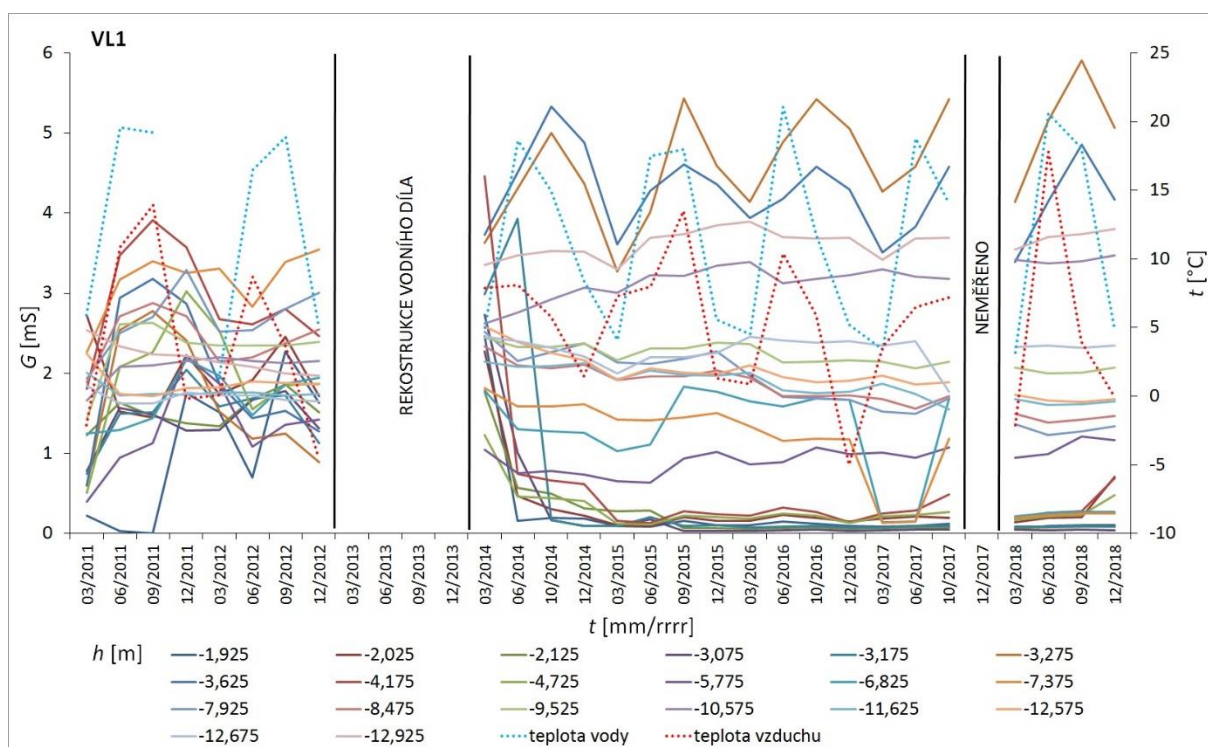
## **6.2 POROVNÁNÍ PRŮBĚHU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI ZEMINY HRÁZE, TEPLoty VODY A TEPLoty VZDUCHU**

Grafy znázorňují vývoj elektrické vodivosti  $G$  zeminy hráze, teploty vody v nádrži a teploty vzduchu (hodnoty měřené vždy v uvedený den v 7:00 hod. ráno) v časovém období březen 2011 až prosinec 2018. Na vodorovné ose grafů je časová osa, na hlavní svislé ose je uvedena hodnota elektrické vodivosti  $G$  určené z měření, na vedlejší svislé ose je teplota  $t$ .

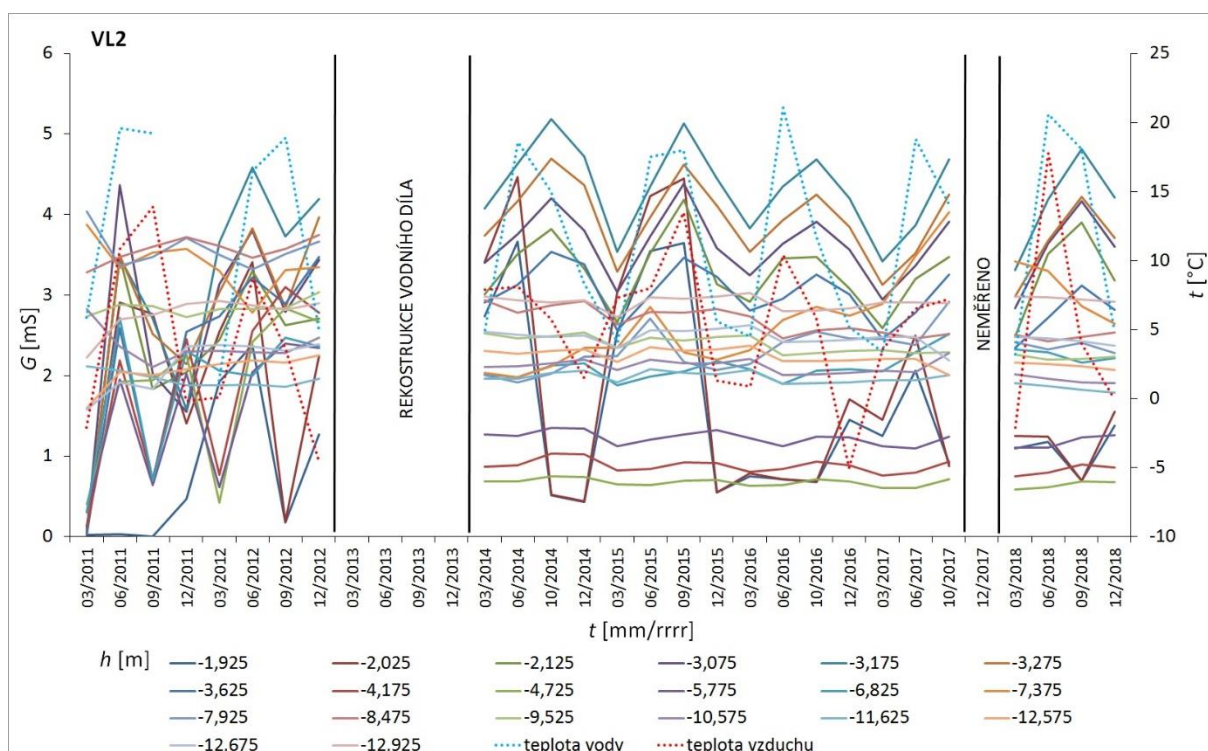
Z grafu (Obr. 6.2) zobrazujícího průběh na sondě VL\_1 je opět patrná změna elektrické vodivosti po instalaci těsnicí stěny. V hloubkách -3,275 m, -3,625 m, -10,575 m a -12,925 m došlo k nárůstu elektrické vodivosti. Zároveň je u prvních dvou zmíněných hloubek možné sledovat výraznou reakci na změny teploty vody a vzduchu. Při zvýšení teploty vody nebo vzduchu došlo se zpožděním i ke zvýšení hodnot elektrické vodivosti. Reakce na změnu teploty vody se jeví jako rychlejší než reakce na změnu teploty vzduchu, což odpovídá skutečnosti, kdy od teplejšího/chladnějšího vzduchu se podle ročního období postupně otepluje/ochlazuje voda v nádrži. Zjištění odpovídá teorii aplikace elektrických odporových metod, do níž spadá i EIS.

V hloubkách -7,925 m, -8,475 m, -9,525 m, -11,625 m, -12,575 m, -12,675 m nedošlo po provedení rekonstrukce k výrazným změnám elektrické vodivosti. Hodnoty zde kolísají v intervalu 1,4 mS – 2,6 mS. V rozsahu hloubek -1,925 m – -3,075 m a -4,175 m – -4,725 m došlo v průběhu roku 2014 k poklesu elektrické vodivosti až na hodnoty menší než 1 mS a drží se na nízkých hodnotách do roku 2018.





Obr. 6.2 Graf časového průběhu elektrické vodivosti, teploty vzduchu a vody v nádrži na sondě VL\_1



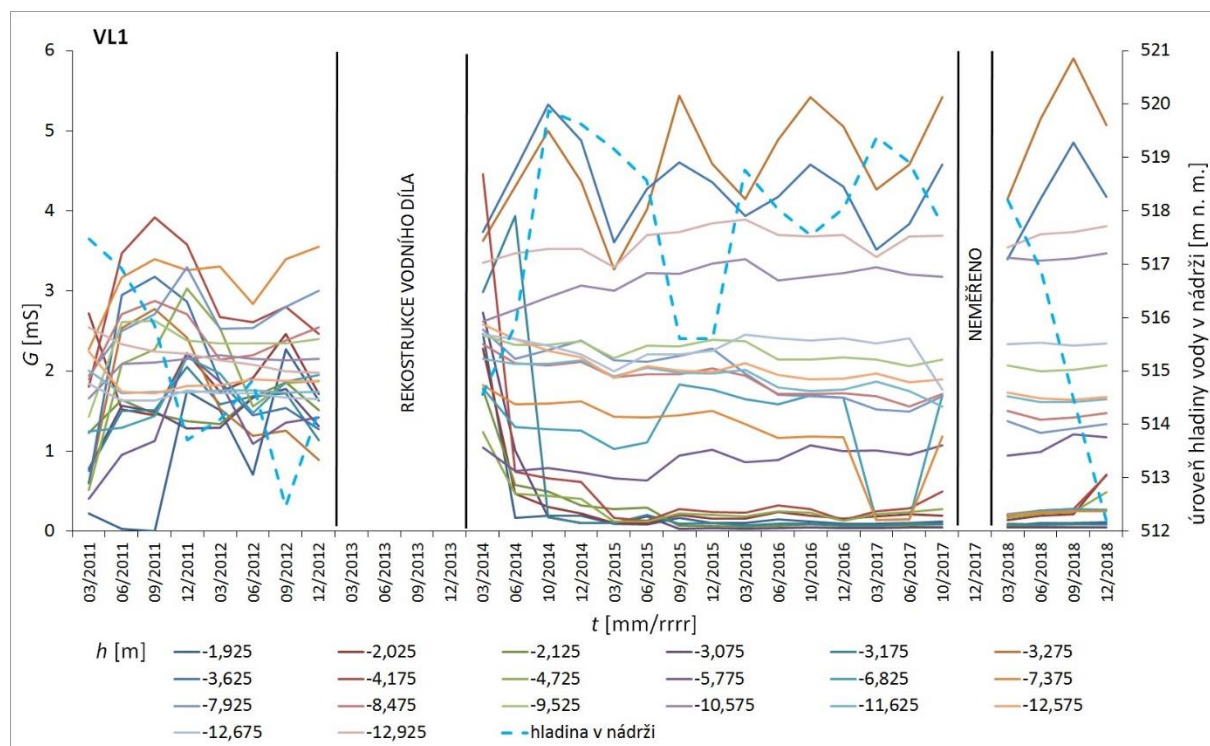
Obr. 6.3 Graf časového průběhu elektrické vodivosti, teploty vzduchu a vody v nádrži na sondě VL\_2

## 6.3 POROVNÁNÍ PRŮBĚHU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI A ÚROVNĚ HLADINY VODY V NÁDRŽI

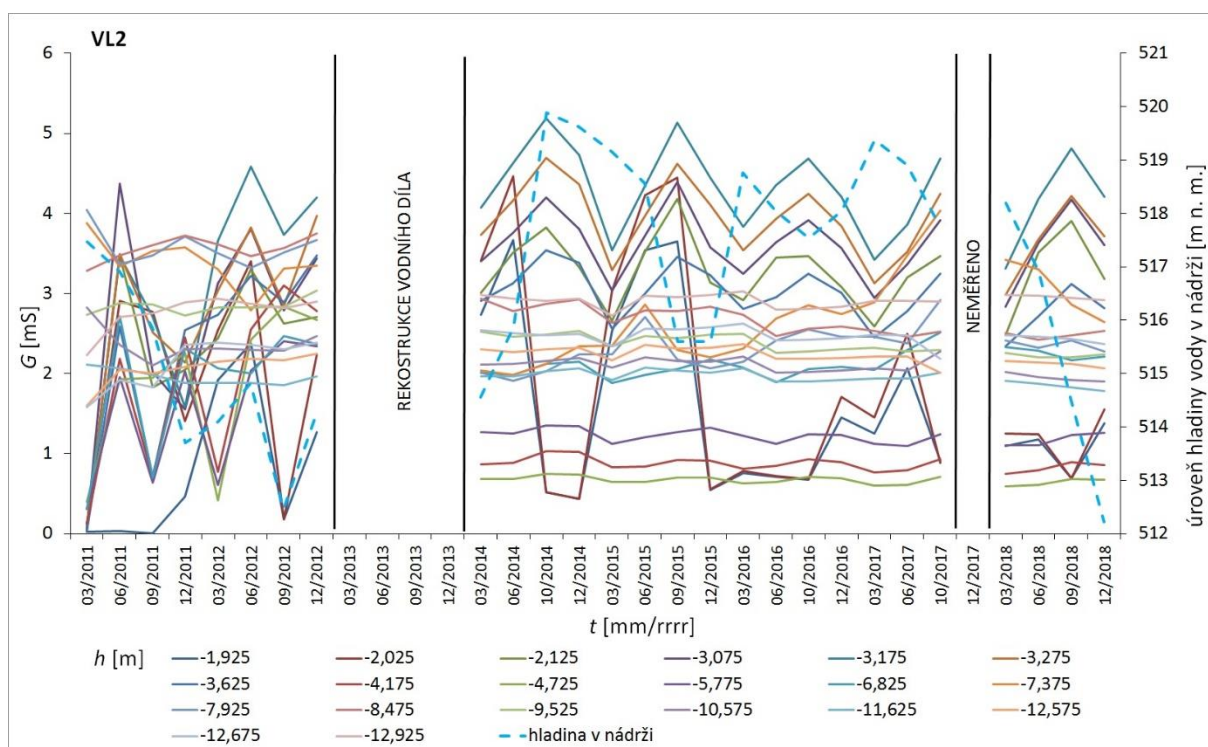
Grafy znázorňují vývoj elektrické vodivosti a změny úrovně hladiny vody v nádrži v časovém období březen 2011 až prosinec 2018. Na vodorovné ose grafů (Obr. 6.4 a 6.5) je časová osa, na hlavní svislé ose je uvedena hodnota elektrické vodivosti  $G$  určené z měření, na vedlejší svislé ose je úroveň hladiny vody v nádrži v m n. m.

Změna elektrické vodivosti zeminy se projevuje s větším zpožděním v reakci na změnu úrovně hladiny vody v nádrži, než jak tomu bylo u změn teplot. V letech 2014 – 2017 lze sledovat manipulaci s hladinou ve vyšších úrovních než před rekonstrukcí. Na tuto skutečnost však reaguje prostředí jen v určitých hloubkách na některých sondách.

Grafy zobrazující porovnání na sondách VL\_3 a VL\_4 jsou v Příloze 4.

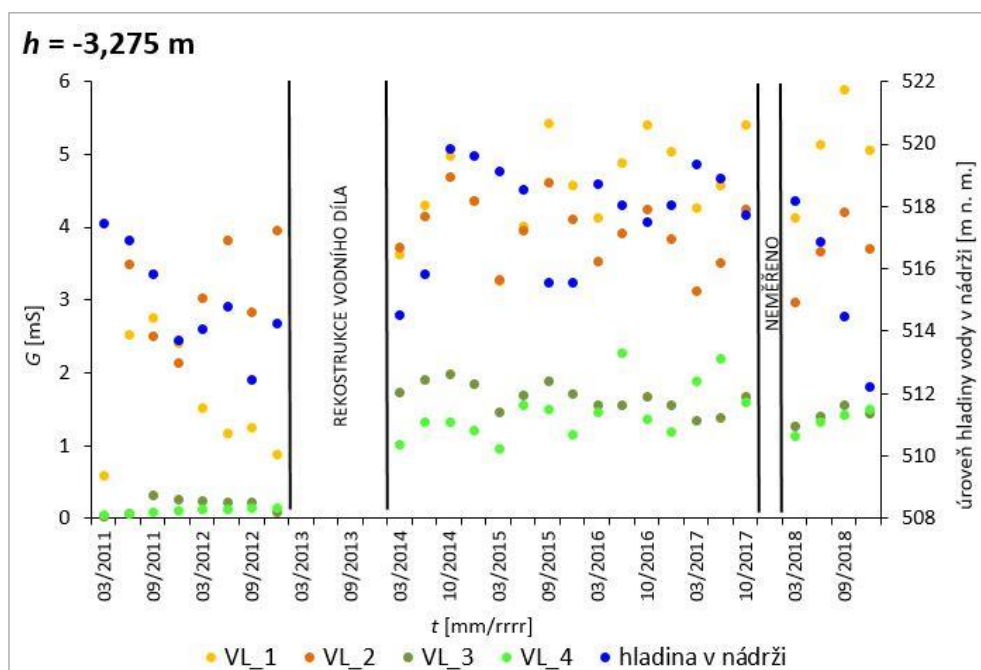


Obr. 6.4 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny na sondě VL\_1



**Obr. 6.5 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny na sondě VL\_2**

Vliv změny úrovně hladiny na změnu elektrické vodivosti je patrný v hloubkách -3,275 m (Obr. 6.6) a -3,625 m. Spolu se změnou úrovně hladiny je vidět kolísání hodnot  $G$  na všech sondách. Vysvětlením uvedených změn může být technologie výstavby těsnicí stěny společně se zajištěním její vlhkosti, kterou přejala i zemina hráze v daných hloubkách.

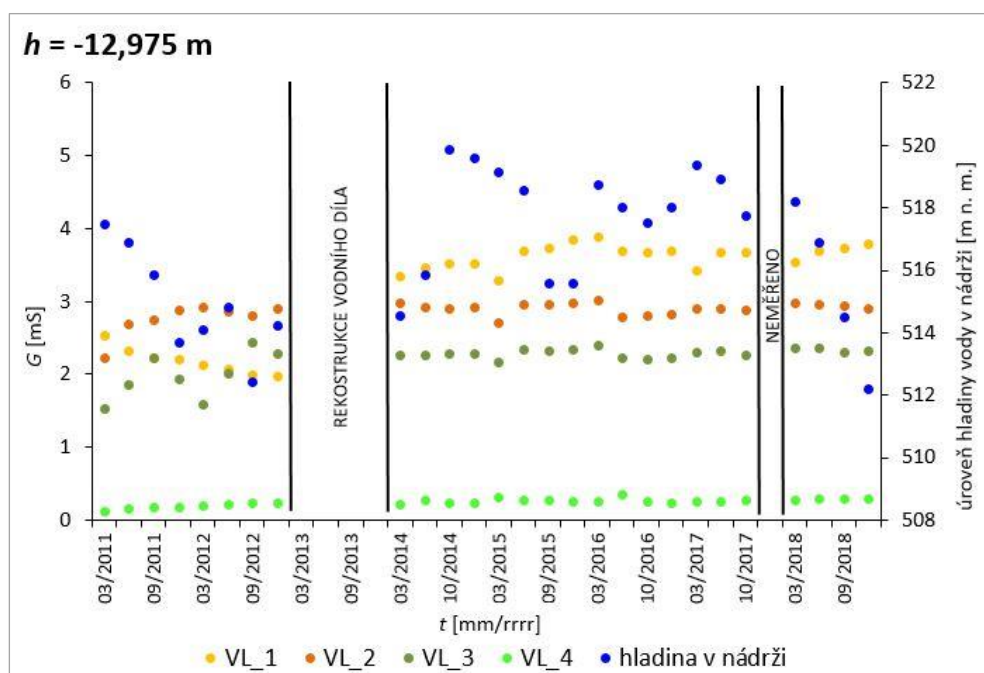


**Obr. 6.6 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v hloubce -3,275 m**



Naproti tomu v hloubkách -12,675 m a -12,975 m (Obr. 6.7) je vliv změny úrovně hladiny na hodnoty  $G$  neznatelný. V hloubce -12,975 m nezávisle na manipulaci s hladinou průměrná hodnota  $G$  na sondě VL\_1 vzrostla oproti stavu před rokem 2013 o 66 %, na sondě VL\_2 o 6 %. Na zbývajících sondách došlo taktéž ke zvýšení průměrné hodnoty  $G$ , na sondě VL\_3 lze ale pozorovat ustálení měřených hodnot a na sondě VL\_4 jsou měřené hodnoty stále nízké. Lze tedy usuzovat, že v úseku VL\_3 a VL\_4 těsnicí stěna dosahuje dostatečné hloubky vzhledem k charakteristikám zeminy hráze.

Grafy zobrazující průběh elektrické vodivosti v dalších hloubkách a úrovně hladiny jsou v Příloze 5.



Obr. 6.7 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v hloubce -12,975 m

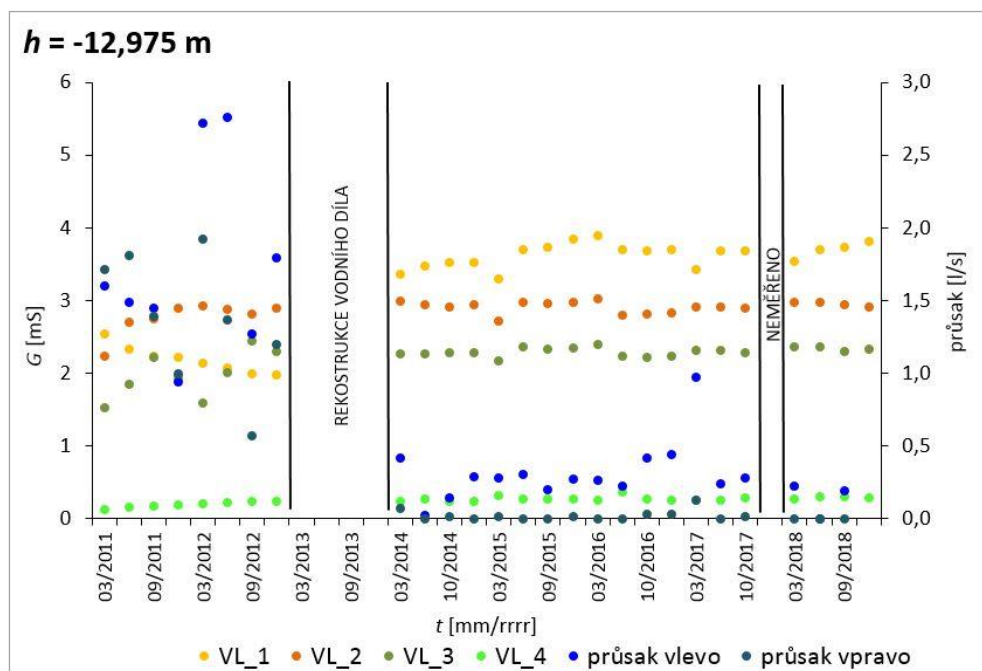
## 6.4 POROVNÁNÍ PRŮBĚHU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI A PRŮSAKŮ

Pro srovnání jsem z důvodu přehlednosti zvolila zobrazení měřených průsaků a průběhu elektrické vodivosti v čase v jednotlivých měřených hloubkových úrovních. Měřené hodnoty průsaků jsou děleny na hodnoty měřené na drenážních perech na levé a pravé straně hráze. Průsaky na horní bermě nejsou od května 2013 pozorovány [2]. Průsaky na dolní bermě dosahují nejvyšších hodnot na levé straně hráze, a to především na drenážních perech D1, D1A, D3, D4, D5B, D5C, D51, D10B a D12. Drény u paty hráze vykazují průsaky také především na levé straně hráze na drenážních perech P3, P4, P6, P8, P9, P10, P13, P15, P19, P21, P25A, P26, P27A a P32. Umístění drenážních per v hrázi je na Obr. 5.1.

Při porovnávání hodnot  $G$  a průsaků je na místě zvážit polohu sond EIS a drenážních per, kde byla daná hodnota naměřena. Sondy VL\_1, VL\_2 a VL\_3 se nachází na levé straně hráze, porovnání hodnot  $G$  na nich naměřených je tedy vhodné s průtoky měřenými na drenážních

perech umístěnými na levé straně hráze. Stejná situace platí pro sondu VL\_4 a drenážní pera umístěná na pravé straně hráze.

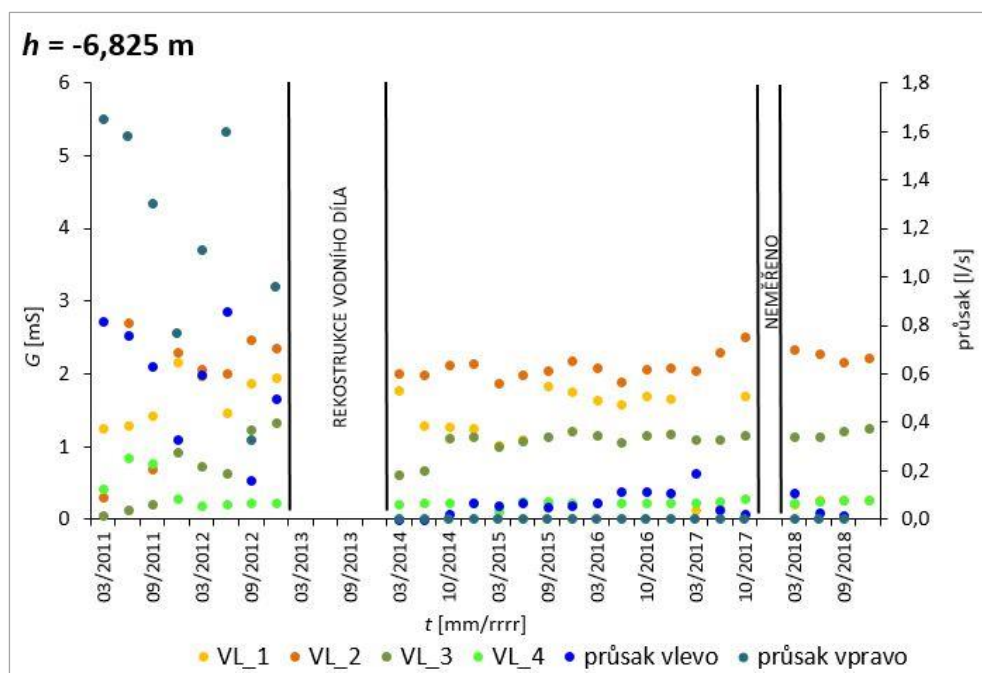
Výkyvy hodnot průsaků v jarních měsících pravděpodobně souvisí s táním sněhové pokrývky [2]. Během celého roku jsou průsaky ukazatelem srážek. Při vyloučení výchylek lze pozorovat srovnatelný průběh měřených průsaků v patě hráze a hodnot  $G$  měřených především v nižších úrovních na sondách VL\_1, VL\_2 a VL\_3. Uvádím graf (Obr. 6.8) pro hloubku -12,975 m, grafy zobrazující stav v ostatních hloubkách jsou v Příloze 6.



**Obr. 6.8 Graf časového průběhu elektrické vodivosti v hloubce -12,975 m a průsaků v patě hráze**

Podobný průběh hodnot lze pozorovat také u průsaků měřených na drenážních perech umístěných na dolní bermě hráze. Průsaky měřené na dolní bermě jsou obecně menší než v patě hráze. Stejně jako u průsaků měřených v patě hráze ale platí, že po instalaci těsnicí stěny došlo k významnému snížení a ustálení měřených hodnot. Na pravé straně hráze jsou průsaky na dolní bermě nulové, v patě hráze minimální. Většina z celkového množství průsaků jak na dolní bermě, tak v patě hráze, je tedy tvořena průsaky měřenými na levé straně hráze.

Uvádím graf (Obr. 6.9) pro hloubku -6,825 m, kde i přes menší průsaky v porovnání s patou hráze je i v menší hloubce stále zřetelná kvalitativní podobnost trendu průběhu elektrické vodivosti a průsaků. Grafy zobrazující stav v ostatních hloubkách jsou v Příloze 7.



Obr. 6.9 Graf časového průběhu elektrické vodivosti v hloubce -6,825 m a průsaků na dolní bermě hráze

## 6.5 POROVNÁNÍ PLOCH POD KŘIVKOU ELEKTRICKÉ VODIVOSTI PODLE HLOUBEK

Plocha byla určena integrálem z křivky elektrické vodivosti v jedné hloubce na sondě v časovém období od března do prosince. Pro výpočet integrálu byla použita obdélníková metoda. Uvedeným způsobem byly určeny plochy pro všechny hloubky na všech sondách, a to v letech 2012, 2014, 2015, 2016 a 2018. Výpočet pro rok 2017 bylo nutné vynechat, jelikož byla měření prováděna jen od února do října. Plocha pod křivkou elektrické vodivosti tedy nemůže být srovnávána s plochami z ostatních let.

Symbol  $I$  označuje hodnotu integrálu, tedy plochu pod křivkou. Změna  $\Delta I$  udává procentuální rozdíl hodnoty  $I$  daného roku a hodnoty  $I$  roku 2012 tj. hodnocena jsou data před a po instalaci těsnicí stěny.

Plochy pod křivkami elektrické vodivosti vypočítané z dat na sondě VL\_1 (Tab. 6.1) znamenají až na výjimky zlepšení stavu. Kromě zmíněných výjimek, kterými jsou hloubky -3,275 m, -3,625 m, -12,675 m, -12,925 m, je zaznamenáno zmenšení plochy v celém rozsahu sondy, ať už k poklesu plochy oproti roku 2012 došlo hned v roce 2014 nebo v následujících letech. Ve většině míst se zmenšení pohybuje řádově v desítkách procent a má stále klesající tendenci.

V hloubkách -3,275 m a -3,625 m jsou zaznamenána několikanásobná zvětšení plochy pod křivkou elektrické vodivosti. Vývoj hodnot v hloubce -3,275 m si dokonce udržuje rostoucí tendenci. Zvětšení ploch v řádech desítek procent je v hloubkách -12,675 m a -12,925 m. Hodnoty zde mírně kolísají nebo lehce stoupají. Z uvedeného by bylo možno usuzovat na nedostatečnou hloubku těsnicí stěny v uvedeném profilu hráze.

**Tab. 6.1 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL\_1**

<i>h</i> [m]	-1,925		-2,025		-2,125		-3,075	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	4,5	0,0	6,1	0,0	5,0	0,0	4,7	0,0
2014	1,7	-62,9	2,0	-66,9	2,1	-57,4	2,6	-45,3
2015	0,3	-92,5	0,4	-93,0	0,5	-89,4	0,3	-94,2
2016	0,4	-91,9	0,6	-90,4	0,2	-96,0	0,1	-97,5
2018	0,3	-93,7	0,8	-86,5	0,2	-95,2	0,1	-97,1
<i>h</i> [m]	-3,175		-3,275		-3,625		-4,175	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	4,8	0,0	3,6	0,0	4,5	0,0	8,0	0,0
2014	5,6	18,6	13,3	264,8	14,1	210,9	3,9	-50,7
2015	0,4	-91,7	13,4	267,1	12,9	182,9	0,6	-92,4
2016	0,3	-94,6	14,9	308,8	12,9	183,0	0,8	-90,3
2018	0,3	-94,4	15,7	329,6	12,8	180,9	1,0	-87,7
<i>h</i> [m]	-4,725		-5,775		-6,825		-7,375	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	5,6	0,0	4,1	0,0	5,3	0,0	9,7	0,0
2014	1,7	-69,3	2,4	-40,7	4,1	-22,8	4,9	-49,3
2015	0,5	-91,1	2,4	-41,1	4,3	-18,3	4,3	-55,2
2016	0,6	-88,7	2,9	-29,3	4,9	-7,1	3,6	-62,7
2018	0,8	-86,2	3,3	-20,4	0,8	-85,5	0,7	-92,7
<i>h</i> [m]	-7,925		-8,475		-9,525		-10,575	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	8,1	0,0	6,9	0,0	7,1	0,0	6,5	0,0
2014	6,9	-15,4	6,4	-7,7	7,1	0,1	8,5	32,0
2015	6,5	-19,8	5,9	-14,8	6,9	-2,3	9,6	48,6
2016	5,2	-35,8	5,3	-24,0	6,5	-7,2	9,6	48,8
2018	3,9	-52,3	4,3	-38,0	6,1	-13,8	10,2	58,2
<i>h</i> [m]	-11,625		-12,575		-12,675		-12,925	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	5,2	0,0	5,6	0,0	5,1	0,0	6,1	0,0
2014	6,3	20,4	7,0	25,1	7,0	38,7	10,4	70,2
2015	6,0	13,9	6,0	7,2	6,5	28,6	11,0	79,4
2016	5,4	3,7	5,8	4,1	7,2	42,2	11,2	82,2
2018	4,9	-6,8	5,0	-10,9	7,0	37,9	11,1	81,2

Údaje ze sondy VL\_2 (Tab. 6.2) hovoří pozitivně pro význam těsnicí stěny. Ačkoli došlo v rozsahu hloubek -1,925 m – -3,625 m v roce 2014, v některých případech i v roce 2015, k nárůstu hodnoty *I*, lze v časové posloupnosti sledovat ustálení hodnot nebo jejich klesající tendenci. V navazujících hloubkách -4,175 m – -10,575 m došlo k jednoznačnému zmenšení plochy oproti roku 2012 a tento klesající trend stále pokračuje v převážné části zmíněného

intervalu. Jedinou výjimkou je plocha určená z měření v hloubce -6,825 m v roce 2018, kdy bylo zaznamenáno zvětšení plochy o 0,5 % oproti roku 2012.

Nejvýrazněji je existence těsnicí stěny na sondě VL\_2 patrná v hloubkách -4,175 m, -4,725 m, -5,775 m, -7,925 m a -8,475 m, kde se zmenšení plochy pohybuje v řádu desítek procent. V nejnižších snímaných hloubkách, tedy v intervalu -11,625 m – -12,925 m, až na tři zaznamenané poklesy oproti roku 2012 lze sledovat nárůst hodnoty  $I$ . Zvýšení plochy ale nikdy nepřekročilo 8 % a lze zde opět pozorovat klesající tendenci. Výjimkou z uvedeného intervalu je hloubka -12,925 m, kde došlo v roce 2018 ke zvýšení hodnoty  $I$ , což může znamenat přetrvávající podtékání těsnicí stěny.

**Tab. 6.2 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL\_2**

$h$ [m]	-1,925		-2,025		-2,125		-3,075	
rok	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]
2012	4,2	0,0	6,0	0,0	8,5	0,0	9,9	0,0
2014	5,8	39,0	6,9	15,5	10,5	23,6	11,6	17,1
2015	8,7	110,4	10,5	75,0	10,6	24,7	11,4	15,7
2016	2,5	-40,0	2,6	-55,8	9,9	16,7	11,0	10,9
2018	3,1	-25,3	3,3	-44,2	10,2	20,6	11,0	11,6
$h$ [m]	-3,175		-3,275		-3,625		-4,175	
rok	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]
2012	12,2	0,0	10,2	0,0	9,2	0,0	7,4	0,0
2014	14,2	16,1	12,9	26,9	9,8	6,5	2,9	-61,4
2015	13,5	10,1	12,3	20,8	9,4	1,6	2,6	-64,5
2016	13,1	6,6	11,9	16,7	9,1	-1,0	2,6	-64,6
2018	12,8	4,2	11,2	10,5	8,4	-8,6	2,5	-66,3
$h$ [m]	-4,725		-5,775		-6,825		-7,375	
rok	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]
2012	6,8	0,0	5,9	0,0	6,7	0,0	9,4	0,0
2014	2,1	-68,5	3,9	-34,0	6,2	-7,6	6,3	-33,2
2015	2,0	-70,3	3,7	-37,6	6,1	-9,3	7,4	-21,2
2016	2,0	-70,3	3,6	-39,4	6,0	-9,8	8,1	-14,2
2018	1,9	-71,5	3,5	-40,6	6,7	0,5	9,2	-2,3
$h$ [m]	-7,925		-8,475		-9,525		-10,575	
rok	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]
2012	10,4	0,0	10,7	0,0	8,6	0,0	7,0	0,0
2014	6,1	-41,8	8,6	-20,0	7,5	-13,0	6,4	-7,7
2015	7,0	-32,4	8,3	-22,6	7,3	-14,8	6,5	-7,1
2016	7,3	-30,2	7,7	-28,3	6,9	-19,3	6,1	-11,7
2018	7,1	-32,0	7,4	-30,7	6,7	-22,6	5,8	-16,2
$h$ [m]	-11,625		-12,575		-12,675		-12,925	
rok	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]	$I$	$\Delta I$ [%]
2012	5,7	0,0	6,6	0,0	7,1	0,0	8,6	0,0
2014	6,0	6,0	6,9	5,2	7,5	6,4	8,8	2,3
2015	6,1	7,3	6,9	5,5	7,6	7,4	8,8	2,1
2016	5,8	2,3	6,6	1,4	7,4	4,6	8,5	-0,8
2018	5,6	-2,0	6,4	-2,7	7,3	3,7	8,9	3,0

Z dat naměřených na sondě VL\_3 (Tab. 6.3) není patrná funkčnost těsnicí stěny. Naopak v místě sondy VL\_3 došlo k výraznému zhoršení stavu. Ve všech měřených hloubkách kromě -4,175 m, -12,575 m, -12,675 m byl zjištěn nárůst plochy pod křivkou elektrické vodivosti. V hloubkách -1,925 m a -2,025 m jde o nárůst hodnot v řádech tisíců procent. Kromě zmíněných výjimek je na zbytku sondy nárůst v řádek stovek a desítek procent. V hloubkách -4,175 m, -12,575 m, -12,675 m lze pozorovat pozvolné zlepšení stavu po instalaci těsnicí stěny. Jedná se ale pouze o tři z dvaceti porovnávaných hloubek. Při uvážení nárůstu ploch v řádech stovek a tisíců procent na většině měřených úrovní, nelze hovořit o kladném vlivu těsnicí stěny.

**Tab. 6.3 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL\_3**

<i>h</i> [m]	-1,925		-2,025		-2,125		-3,075	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	0,3	0,0	0,2	0,0	0,4	0,0	0,8	0,0
2014	13,8	5149,3	16,0	7566,8	3,4	759,1	3,4	302,9
2015	13,8	5134,6	16,2	7681,4	2,9	632,0	2,8	237,5
2016	13,1	4874,0	15,1	7169,3	2,6	573,0	2,6	210,2
2018	13,8	5144,2	15,9	7528,8	2,7	588,5	2,7	216,6
<i>h</i> [m]	-3,175		-3,275		-3,625		-4,175	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	0,8	0,0	0,6	0,0	1,1	0,0	4,1	0,0
2014	10,1	1211,1	5,7	806,1	3,8	234,6	4,2	0,8
2015	8,9	1059,1	5,2	724,0	4,3	283,2	4,9	18,2
2016	8,0	941,4	4,8	662,6	4,2	271,1	4,6	11,3
2018	7,6	892,5	4,4	591,6	2,8	151,5	3,2	-22,1
<i>h</i> [m]	-4,725		-5,775		-6,825		-7,375	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	0,9	0,0	0,8	0,0	2,9	0,0	2,3	0,0
2014	1,7	89,4	1,3	71,0	2,7	-7,6	2,5	7,6
2015	1,8	107,2	1,6	112,6	3,3	14,7	2,8	19,2
2016	2,0	123,1	1,8	142,6	3,4	16,3	3,8	63,1
2018	2,1	142,8	2,0	168,6	3,6	22,6	4,3	86,3
<i>h</i> [m]	-7,925		-8,475		-9,525		-10,575	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	2,1	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	4,5	0,0
2014	2,1	-3,1	1,1	36,7	1,5	78,4	5,4	18,6
2015	3,6	67,6	1,7	117,6	1,8	115,9	5,9	29,9
2016	5,4	151,6	1,8	124,1	1,8	118,8	5,9	30,8
2018	6,1	187,8	1,8	122,9	1,8	117,6	6,2	37,3
<i>h</i> [m]	-11,625		-12,575		-12,675		-12,925	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	1,9	0,0	2,3	0,0	5,2	0,0	6,4	0,0
2014	1,9	5,2	2,3	-0,6	5,1	-1,9	6,8	6,6
2015	2,1	12,0	2,3	-3,1	4,6	-11,7	7,0	8,7
2016	2,1	12,8	1,6	-32,0	2,7	-48,8	6,8	5,8
2018	2,2	16,2	1,3	-45,7	1,8	-65,3	7,0	9,6

Na sondě VL\_4 došlo k nejvýraznějšímu zhoršení stavu v hloubkách -3,275 m a -3,625 m, stejně jako na sondě VL\_1. Nárůst ploch se pohybuje v řádech tisíců procent oproti hodnotě

z roku 2012. Nárůst hodnot, avšak ne tak výrazný, je možno pozorovat také v hloubkách -1,925 m, -2,025 m, -2,125 m, -4,175 m, -4,725 m, -11,625 m.

V hloubkách -6,825 m, -7,375 m a rozsahu -12,575 m – -12,925 m se dá hovořit o střídavém zmenšování a zvětšování plochy pod křivkou elektrické vodivosti. Hodnoty zde naměřené jsou ale stále minimální, a tak relativní procentuální srovnávání může být zavádějící.

Ve zbývajících úrovních oblasti sledované sondou VL\_4 je zaznamenáno zlepšení stavu v řádech desítek procent.

**Tab. 6.4 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL\_4**

<i>h</i> [m]	-1,925		-2,025		-2,125		-3,075	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	3,2	0,0	2,8	0,0	4,1	0,0	6,0	0,0
2014	3,6	15,5	3,3	17,0	4,7	12,9	5,9	-1,7
2015	3,3	5,6	3,0	8,1	4,9	17,9	6,0	0,2
2016	4,6	44,3	4,1	45,9	3,6	-13,0	4,2	-29,2
2018	5,5	72,8	4,7	66,2	4,4	6,2	5,4	-9,8
<i>h</i> [m]	-3,175		-3,275		-3,625		-4,175	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	6,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	1,4	0,0
2014	5,2	-19,6	3,8	795,7	6,8	1448,4	1,5	6,0
2015	5,8	-9,5	4,1	879,9	6,8	1461,4	2,0	37,5
2016	5,1	-20,7	5,0	1079,4	11,5	2526,8	2,2	49,0
2018	5,0	-21,5	4,1	871,8	7,9	1696,2	2,1	48,0
<i>h</i> [m]	-4,725		-5,775		-6,825		-7,375	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	1,3	0,0	5,3	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0
2014	1,3	-4,5	3,0	-44,1	0,7	4,3	0,7	9,1
2015	1,6	19,9	3,2	-39,2	0,7	2,0	0,1	-75,6
2016	1,7	29,6	3,0	-43,1	0,7	7,4	0,7	11,8
2018	1,7	29,6	3,0	-43,1	0,8	17,2	0,7	18,8
<i>h</i> [m]	-7,925		-8,475		-9,525		-10,575	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	4,6	0,0	7,4	0,0	6,2	0,0	5,4	0,0
2014	3,0	-34,6	1,6	-78,9	1,4	-78,2	2,0	-63,0
2015	0,6	-87,1	2,2	-70,7	1,9	-70,0	3,4	-38,0
2016	2,9	-36,9	1,8	-76,2	1,7	-73,0	3,4	-37,3
2018	2,6	-44,4	1,8	-75,3	1,8	-71,8	3,1	-42,2
<i>h</i> [m]	-11,625		-12,575		-12,675		-12,925	
rok	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]	<i>I</i>	$\Delta I$ [%]
2012	0,9	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0	0,7	0,0
2014	2,4	156,8	0,7	-7,0	0,4	-28,6	0,7	8,2
2015	3,6	288,0	0,8	3,3	0,5	-19,5	0,8	22,0
2016	3,6	286,8	0,9	12,8	0,5	-12,1	0,9	27,6
2018	3,1	242,3	0,9	15,6	0,5	-9,2	0,9	28,9

## 7 ZÁVĚR

Již od prvního napuštění nádrže se na VD Karolinka vyskytovaly problémy s průsaky. Bylo zjištěno, že příčinou je pravděpodobně provedení, použitý materiál těsnicího jádra a nedodržení původně projektovaného převýšení těsnicího jádra nad maximální úroveň hladiny vody v nádrži. Z toho důvodu byl provoz vodního díla do roku 2013 omezen a nádrž nemohla stoprocentně plnit svou funkci. V roce 2013 proběhla rekonstrukce VD, která zahrnovala mimo jiné vybudování těsnicí stěny pod korunou hráze. Monitorování zemní hráze probíhá už od roku 1987, kdy byly zbudovány první drenážní vrty na horní bermě sloužící k měření hladiny vody v násypu hráze. V průběhu následujících let byly zbudovány drenážní pera odvádějící vodu ze zavázání a drenážní pera na horní bermě, dolní bermě a v patě hráze. V březnu 2011 byly na vzdušní stranu zemní hráze do těsnicího jádra z koruny instalovány 4 tyčové sondy pro monitorování metodou EIS. Metoda EIS je identifikátorem případného zvýšení nasycenosti zeminy vodou, tedy možné katastrofy. Ve své diplomové práci jsem porovnávala data z let 2011 až 2018, s výjimkou roku 2013, naměřená v měsících březnu, červnu, září a prosinci. Analýzou dat naměřených v uvedených měsících je zajištěno porovnání v podmínkách, které nastávají v průběhu kalendářního roku.

Ze zobrazení elektrické vodivosti  $G$  po hloubce je patrný nárůst jejích hodnot v hloubce -3,2 m – -3,7 m. Byl zde také zjištěn nárůst ploch pod křivkami elektrické vodivosti v řádech stovek až tisíců procent, a to na sondách VL\_1, VL\_3 a VL\_4. Na sondě VL\_2 byl ve zmíněných hloubkách zaznamenán menší nárůst plochy pod křivkou elektrické vodivosti a současně se plocha každým rokem zmenšuje. Zmíněný stav může být způsoben prováděním technologie výstavby těsnicí stěny společně se zajištěním její vlhkosti, kterou přejala i zemina hráze v daných hloubkách. Dále byl pozorován pozvolný nárůst hodnot  $G$  ve hloubkách blízkých se -13 m, který je po instalaci těsnicí stěny významnější. Uvedená skutečnost naznačuje podtékání těsnicí stěny a je nejpatrnější v oblastech sond VL\_1 a VL\_2 ve všech porovnávaných měsících. V uvedených profilech tedy těsnicí clona pravděpodobně nedosahuje potřebné hloubky. Celková průměrná hodnota  $G$  na sondě VL\_1 poklesla ve všech měsících, byť v měsíci březnu jen o 1,9 %. Na sondách VL\_2 a VL\_4 došlo z hlediska celkové průměrné hodnoty  $G$  k ustálení. Na sondě VL\_3 došlo k nárůstu o více než 100 %, celková průměrná hodnota  $G$  ale ani v jednom z porovnávaných měsíců nedosahuje 2 mS. Množství měřených celkových průsaků v patě hráze pokleslo ve všech měsících o 88 – 96 %.

Po zvážení všech zmíněných výsledků analýz lze tvrdit, že instalací těsnicí stěny došlo ke zlepšení anebo ustálení stavu. Je však důležité i nadále pozorovat zmíněné rizikové profily a hloubky. Je podstatné snížení množství měřených průsaků. Stejně důležité je ale současné provádění měření sondami EIS, které průběžně ukazuje přítomnost vody v tělese hráze po hloubce.

V Brně dne 4.1.2019

.....  
podpis



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

BROŽA, Vojtěch. SATRAPA, Ladislav. *Hydrotechnické stavby 2: Přehrady*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03655-6.

BROŽA, Vojtěch. KRATOCHVÍL, Jiří. PETER, Pavel. VOTRUBA, Ladislav. *Přehrady*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987, 548 s.

ČSN 75 2410. *Malé vodní nádrže*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

FEJFAROVÁ, Marie. *Možnosti detekce obsahu vody v pórovitém prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie*. Brno, 2014. 150 s., 20 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

HODÁK, Jiří. *VD Karolinka – TBD při realizaci podzemní těsnicí stěny*, příspěvek na konferenci XXXIV. *Priehradné dni 2014*, ISBN 978-80-971596-6-5, Slovenský vodohospodársky podnik, š.p. Odštepny závod Košice, Košice, SR, 2014

JAREŠ, Zbyněk. KREJČÍ, Vlastimil. *VD Karolinka – rekonstrukce hráze* (Karolinka water reservoir – dam reconstruction). Setkání vodohospodářských kateder 2015 (Meeting of water management departments), 2015.

KRATOCHVÍL, Jiří. STARA, Vlastimil. *Přehrady*. Brno: Vysoké učení technické, 1985, 225 s. ISBN 80-214-0094-3.

KRATOCHVÍL, Stanislav. *Hydrotechnický výzkum 2. Měření na hydrotechnických stavbách*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 208 s.

KRATOCHVÍL, Stanislav. *Vodní nádrže a přehrady*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961, 956 s.

LUKÁČ, Michal. BEDNÁROVÁ, Emília. *Navrhovanie a prevádzka vodných stavieb: Sypané priehrady a hrádze*. Bratislava: Jaga group. 2006. ISBN 80-8076-015-2.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. *EUREKA 2013: 1st conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!4981 : October 30 to November 1, 2013: Karolinka, Czech Republic*. 2013, 275 s. ISBN 978-80-214-4735-6.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. RADKOVSKÝ, Karel. *Z-metr IV – uživatelský manuál*. LVV ÚVST, FAST, VUT v Brně, 24 str., 2016.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. *Systém sledování vybraných parametrů porézních látek metodou EIS v širokém spektru aplikací. Oponovaná zpráva za rok 2013*, Brno, leden 2014. Vysoké učení technické v Brně a GEOtest, a.s.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. ZACHOVAL, Zbyněk. GOMBOŠ, Milan. PAVELKOVÁ, Dana. GJUNSBURGS, Boriss. GINTS, Jaudzems. YANEV, Yanko. TONEVA-ZHEYNOVA,

Daniela. ZYDRON, Tymoteusz. GRUCHOT, Andrzej. *Monitoring changes of water content in soil pores of earth dams*, příspěvek na konferenci *EUREKA 2017 - 5th conference and working session*, ISSN 2464-4595, ISBN 978-80-214-5573-3, VUTUM BUT, Brno, 2017.

PAŘÍLKOVÁ, Jana. ZACHOVAL, Zbyněk. PAŘÍLEK, Luboš. FRÁNKOVÁ, Hana. LLINARES, Lorenzo Garcia. *The earth-fill dam of the Karolinka reservoir monitored by the EIS method*, *EUREKA 2014*, ISBN 978-80-214-4883-4, pp. 159-176.

PAVELKA, Karel, 2003. *Fotogrammetrie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2655-8.

SÍLOVÁ, Tereza. *VD Karolinka – těsnicí clona*. Závěrečná práce. PMO, s.p. 2015, 17 s.

SMITH, Norman. *A history of dams*. Londýn: Peter Davies, 1971. ISBN 4321510900.

TELFORD, William Murray. *Applied geophysics*. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. ISBN 05-213-3938-3.

VOTRUBA, Ladislav. BROŽA, Vojtěch. KAZDA, Ivo. 1978. *Přehrady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

*Vyhláška Ministerstva zemědělství: o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly*, 2001. In: . 171/2001, 471/2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-471>

### ***Další použité zdroje***

[1] VD Karolinka. *Povodí Moravy* [online]. Poslední editace 1/2012 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/karolinka/>

[2] data Vodní díla – TBD a. s.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČSN	Česká technická norma
EIS	elektrická impedanční spektrometrie
FAST	Fakulta stavební
HPV	hladina podzemní vody
IGP	inženýrsko-geologický průzkum
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
PC	osobní počítač (Personal Computer)
TBD	technickobezpečnostní dohled
ÚVST	Ústav vodních staveb
VD	vodní dílo
VPN	velmi přesná nivelace
VUT	Vysoké učení technické v Brně

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	název	jednotka
$A$	plocha (průřezu; elektrického vodiče)	$[m^2]$
$f$	frekvence budicího signálu	$[Hz]$
$G$	elektrická vodivost	$[S]$
$h$	hloubka elektrod	$[m]$
$I$	hodnota integrálu	$[-]$
$L$	délka	$[m]$
$l$	vzdálenost dvou elektrod	$[m]$
$R$	rezistance	$[\Omega]$
$t$	teplota	$[^{\circ}C]$
$V$	objem zeminy	$[m^3]$
$X$	reaktance	$[\Omega]$
$X_C$	kapacitance	$[\Omega]$
$Z$	fázor elektrické impedance	$[\Omega]$
$ Z $	modul elektrické impedance	$[\Omega]$
$\rho$	rezistivita	$[\Omega \cdot m]$
$\sigma$	konduktivita	$[S \cdot m^{-1}]$
$\varphi$	fázový posun	$[-]$
$\omega$	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Zobrazení zděné hráze na řece Anio (Smith, 1971) .....	9
Obr. 2.1 Klasifikační diagram zemin s částicemi < 60 mm (ČSN 75 2410) .....	14
Obr. 2.2 Diagram plasticity (pro částice < 0,5 mm) (ČSN 75 2410).....	14
Obr. 2.3 Mezní křivky zrnitosti zemin vhodných pro konstrukci zemní hráze (ČSN 75 2410) .....	15
Obr. 4.1 Znázornění fázoru elektrické impedance.....	25
Obr. 4.2 Princip měření elektrické impedance zeminy.....	26
Obr. 4.3 Přístroj Z-metr IV .....	27
Obr. 4.4 Schéma připojení sondy a příslušenství přístroje .....	27
Obr. 5.1 Zakreslení sond EIS a drenážních per v situaci [2] .....	32
Obr. 5.2 Podélný řez hrází se zakreslením těsnicí stěny a sond EIS (Pařílková, 2017) .....	32
Obr. 5.3 Pozice snímačů na tyčové sondě (Pařílková, 2014) .....	33
Obr. 6.1 Grafy průběhů elektrické vodivosti na sondě VL_4.....	35
Obr. 6.2 Graf časového průběhu elektrické vodivosti, teploty vzduchu a vody v nádrži na sondě VL_1.....	37
Obr. 6.3 Graf časového průběhu elektrické vodivosti, teploty vzduchu a vody v nádrži na sondě VL_2.....	37
Obr. 6.4 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny na sondě VL_1 .....	38
Obr. 6.5 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny na sondě VL_2 .....	39
Obr. 6.6 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v hloubce -3,275 m ..	39
Obr. 6.7 Graf časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v hloubce -12,975 m	40
Obr. 6.8 Graf časového průběhu elektrické vodivosti v hloubce -12,975 m a průsaků v patě hráze.....	41
Obr. 6.9 Graf časového průběhu elektrické vodivosti v hloubce -6,825 m a průsaků na dolní bermě hráze.....	42

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Klasifikace štěrkových zemin (ČSN 75 2410) .....	12
Tab. 2.2 Klasifikace písčitých zemin (ČSN 75 2410) .....	13
Tab. 2.3 Klasifikace jemnozrnných zemin (ČSN 75 2410) .....	13
Tab. 2.4 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází (ČSN 75 2410) .....	14
Tab. 2.5 Orientační fyzikálně mechanické vlastnosti zhutnělých zemin (ČSN 75 2410) .....	15
Tab. 4.1 Základní parametry přístroje Z-metr IV .....	28
Tab. 6.1 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL_1 .....	43
Tab. 6.2 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL_2 .....	44
Tab. 6.3 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL_3 .....	45
Tab. 6.4 Plochy pod křivkami elektrické vodivosti na sondě VL_4 .....	46

## SEZNAM PŘÍLOH

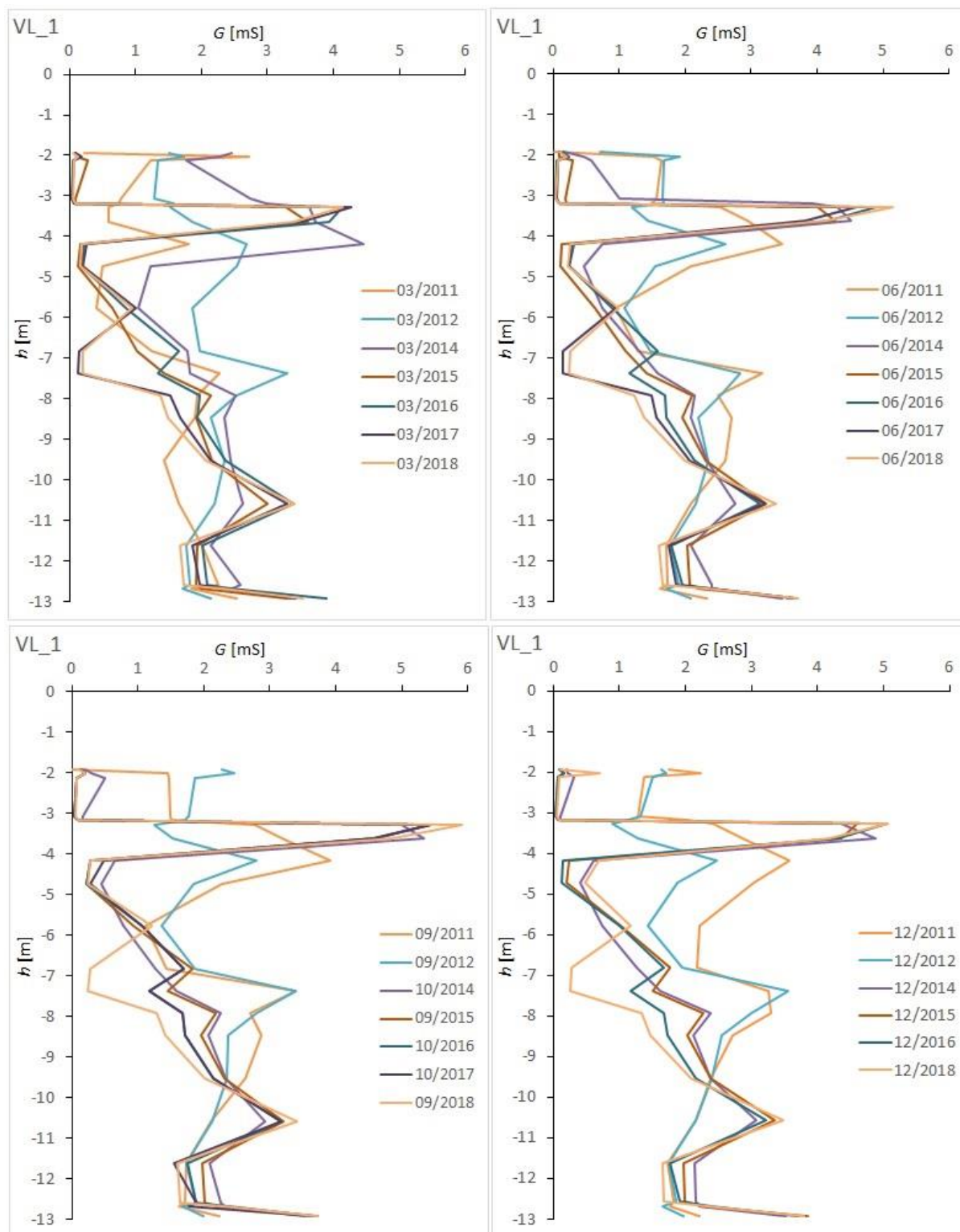
Příloha 1	Kritéria pro zařazení vodního díla do kategorie (Vyhláška Ministerstva zemědělství, 2001) .....	55
Příloha 2	Grafy průběhu elektrické vodivosti .....	56
Příloha 3	Grafy porovnání průběhů elektrické vodivosti, teploty vzduchu a teploty vody v nádrži .....	59
Příloha 4	Grafy porovnání průběhů elektrické vodivosti a úrovně hladiny v nádrži .....	60
Příloha 5	Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v jednotlivých hloubkách.....	61
Příloha 6	Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a průsaků v patě hráze.....	68
Příloha 7	Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a průsaků na dolní bermě.....	75

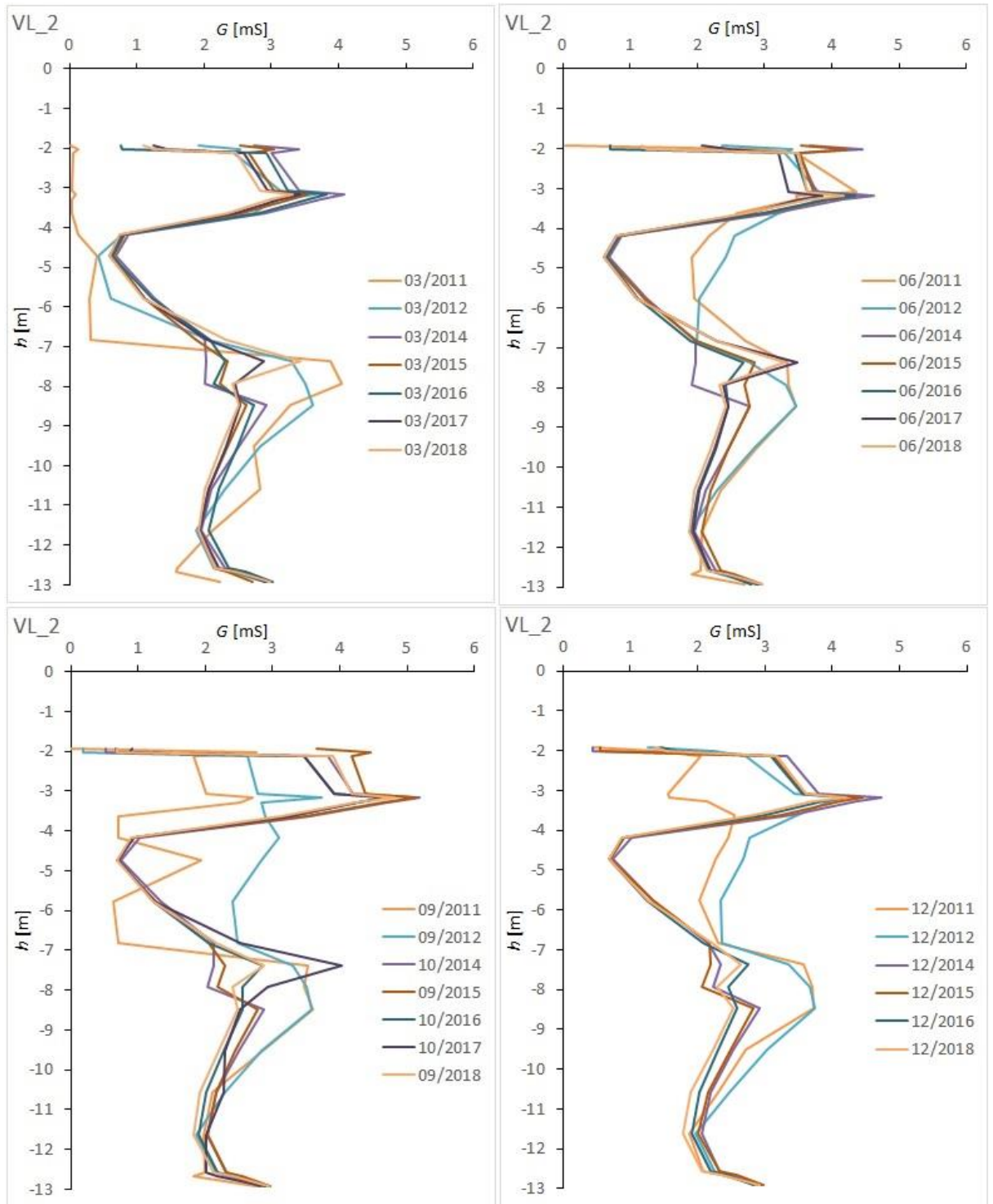
## Příloha 1 Kritéria pro zařazení vodního díla do kategorie (Vyhláška Ministerstva zemědělství, 2001)

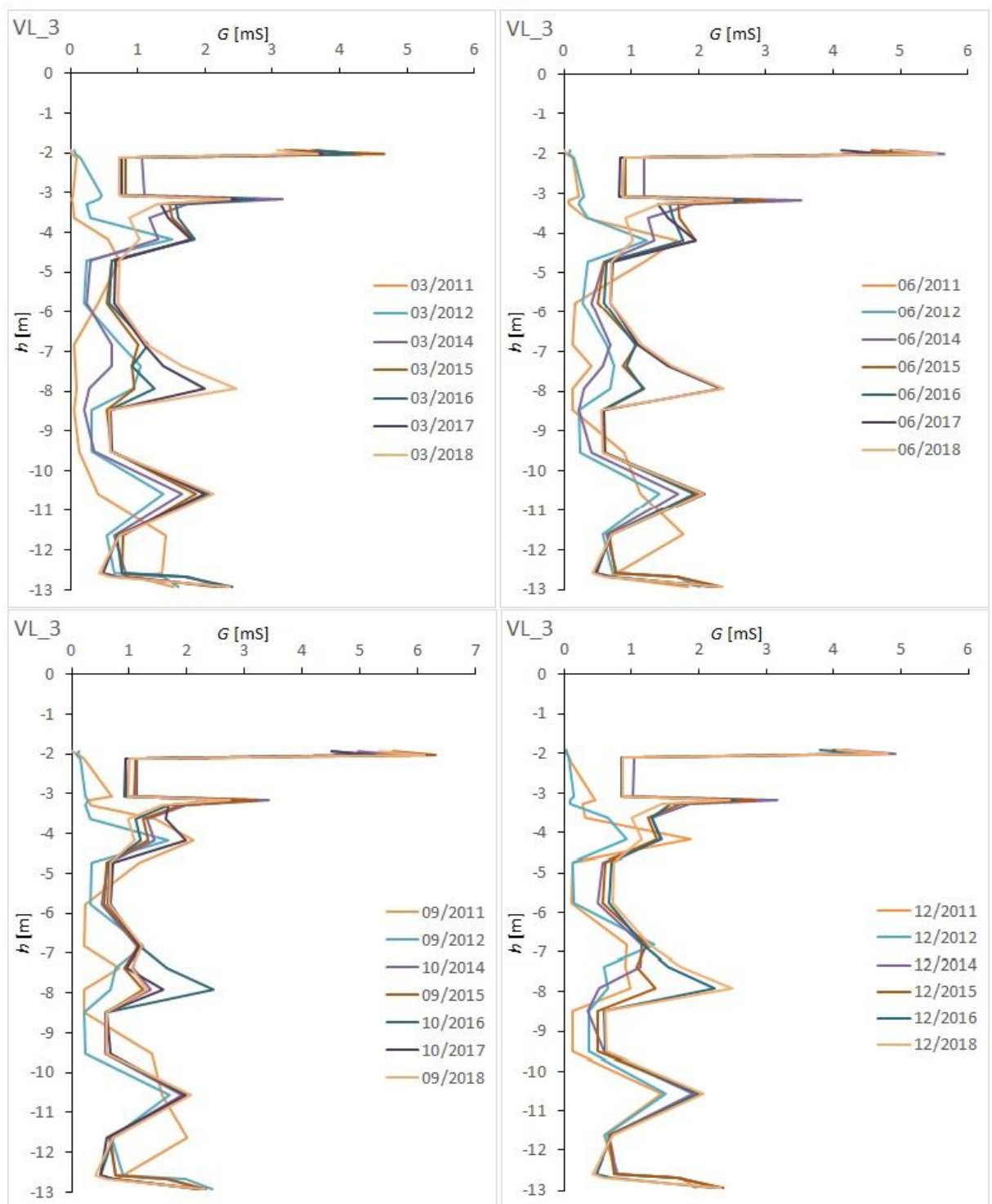
Kategorie	Kritéria
I.	Ohroženy řádově tisíce až desetitisíce lidí a předpokládány velké ztráty na lidských životech. Velké škody na určeném vodním díle, jehož následná obnova je velmi složitá a nákladná. V území na vodním toku pod určeným vodním dílem vzniknou rozsáhlé škody na obytné a průmyslové zástavbě, silniční a železniční síti, ohrožena jsou další určená vodní díla nebo jiná vodní díla. Ztráty způsobené vyřazením určeného vodního díla z provozu, z přerušení průmyslové výroby, dopravy ap. jsou velmi vysoké a těžko nahraditelné. Škody na životním prostředí jsou vysoké, překračují význam vyššího územního samosprávného celku, ekonomické důsledky se dotýkají celého státu.
II.	Ohroženy řádově stovky až tisíce lidí a předpokládány ztráty na lidských životech. Značné škody na určeném vodním díle, jeho následná obnova je složitá a nákladná. V území na vodním toku pod určeným vodním dílem vzniknou škody na obytné a průmyslové zástavbě, dopravní síti, ohrožena jsou další určená vodní díla nebo jiná vodní díla. Ztráty způsobené vyřazením určeného vodního díla z provozu, z přerušení průmyslové výroby, dopravy nebo jiné ztráty jsou značné. Škody na životním prostředí překračují význam vyššího územního samosprávného celku.
III.	Ohroženy řádově desítky až stovky lidí, mohou být ztráty na lidských životech. Poškození určeného vodního díla, obnova je proveditelná. V území na vodním toku pod určeným vodním dílem vzniknou škody na obytné a průmyslové zástavbě i dopravní síti, ohrožena mohou být další méně významná vodní díla. Ztráty způsobené vyřazením určeného vodního díla z provozu, z přerušení průmyslové výroby, dopravy nebo jiné ztráty jsou plně nahraditelné. Škody na životním prostředí nepřekračují význam vyššího územního samosprávného celku.
IV.	Ztráty na životech jsou nepravděpodobné. Poškození určeného vodního díla, obnova je proveditelná. V území na vodním toku pod určeným vodním dílem jsou malé materiální škody. Ztráty způsobené vyřazením určeného vodního díla z provozu jsou malé. Škody na životním prostředí jsou zanedbatelné.



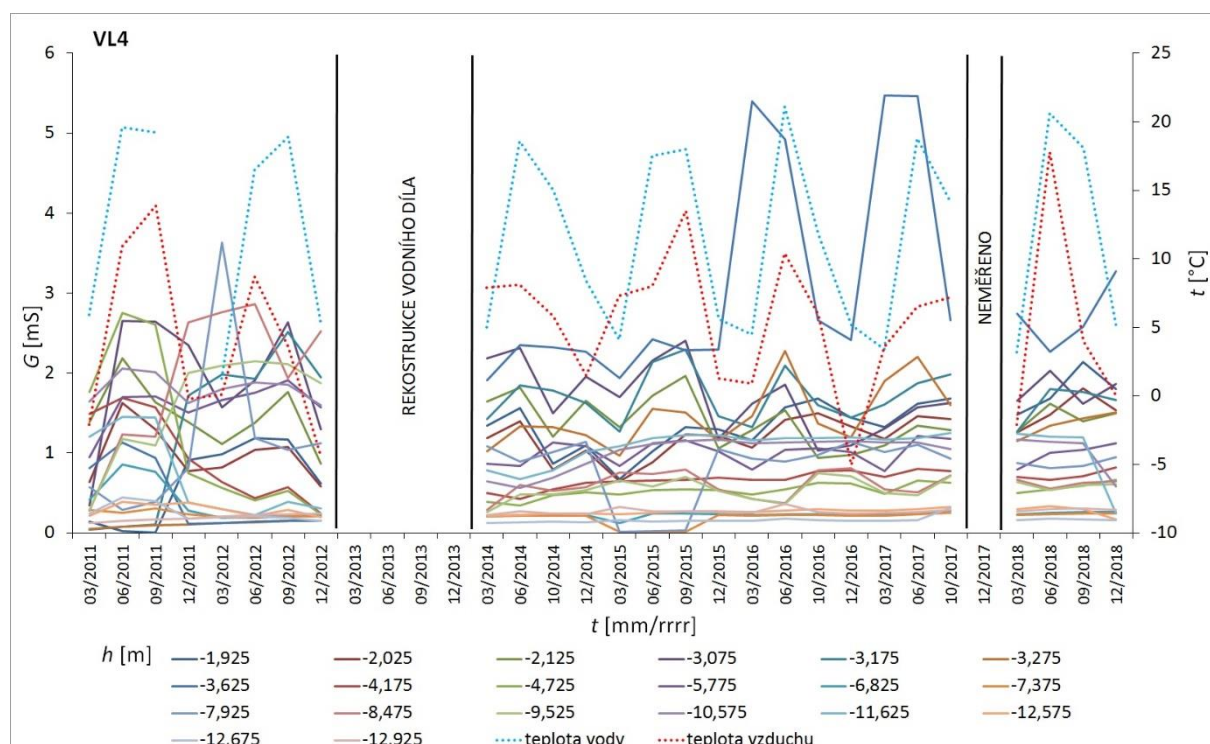
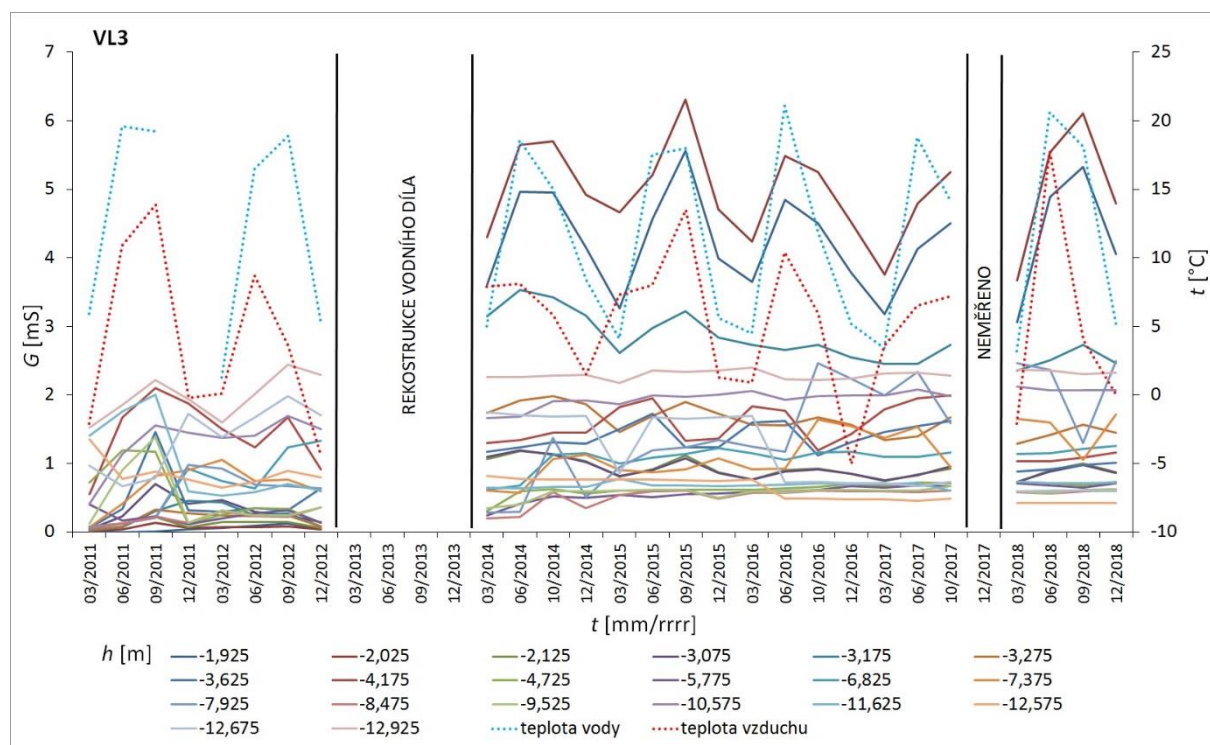
## Příloha 2 Grafy průběhu elektrické vodivosti





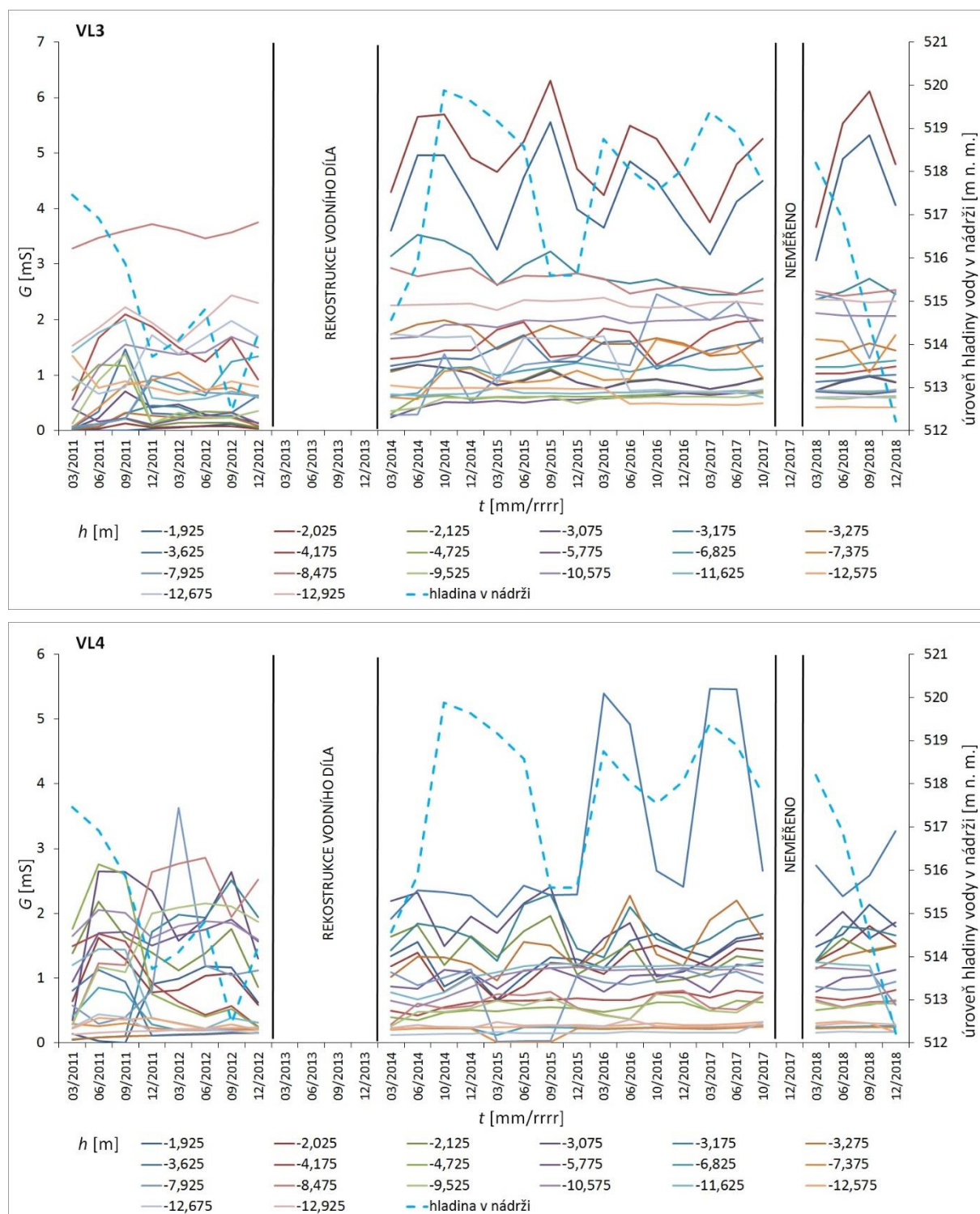


### Příloha 3 Grafy porovnání průběhů elektrické vodivosti, teploty vzduchu a teploty vody v nádrži

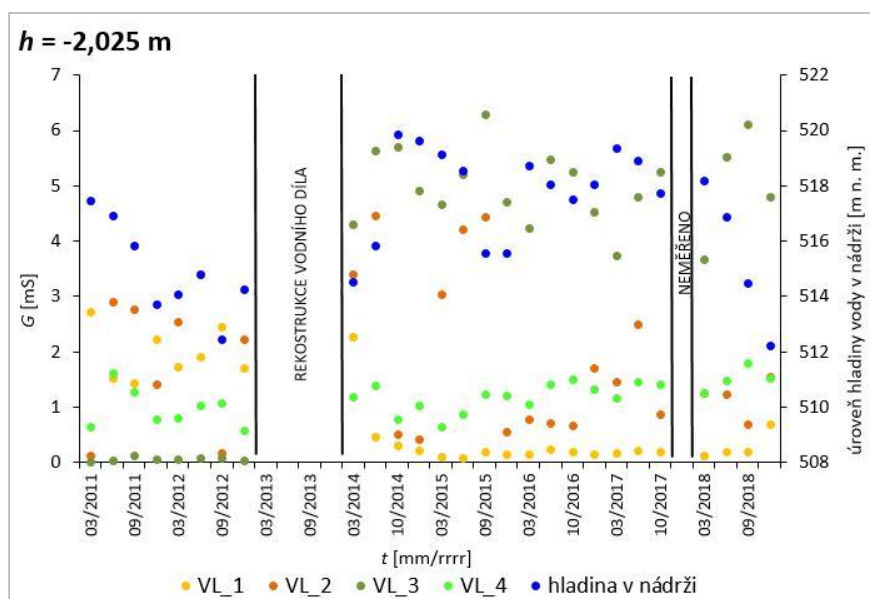
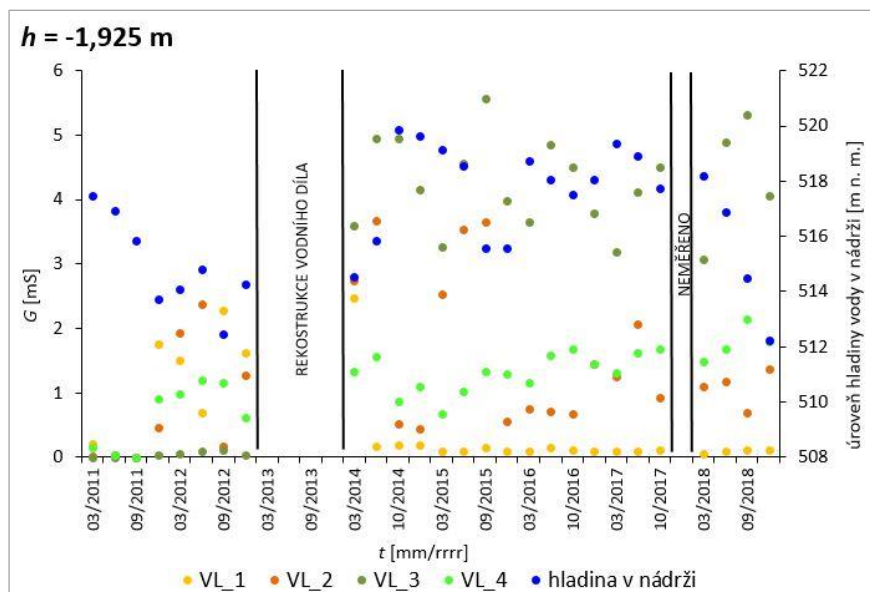


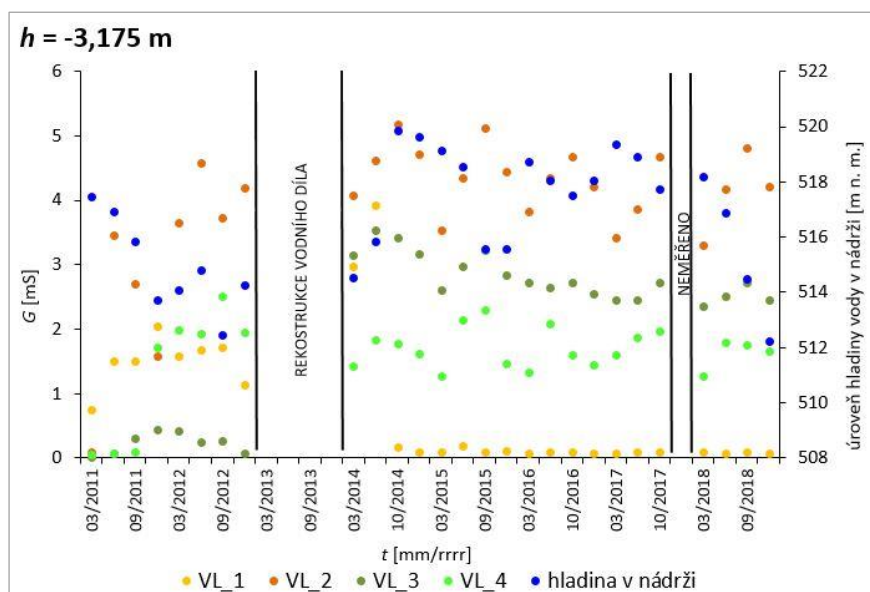
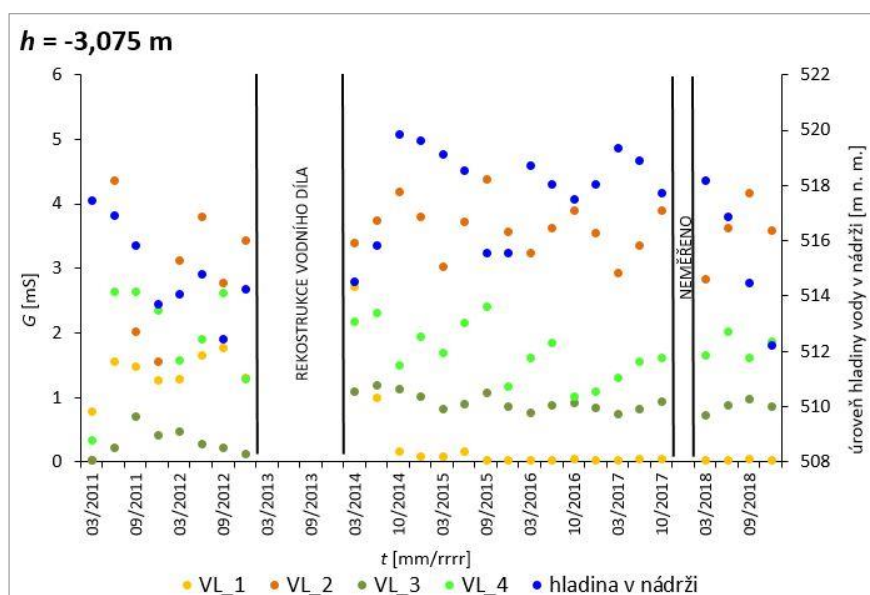
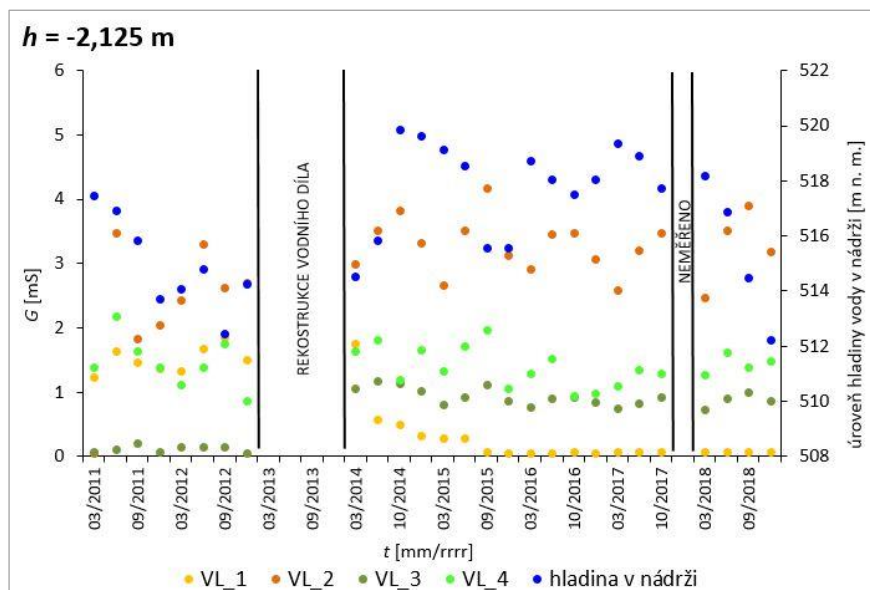


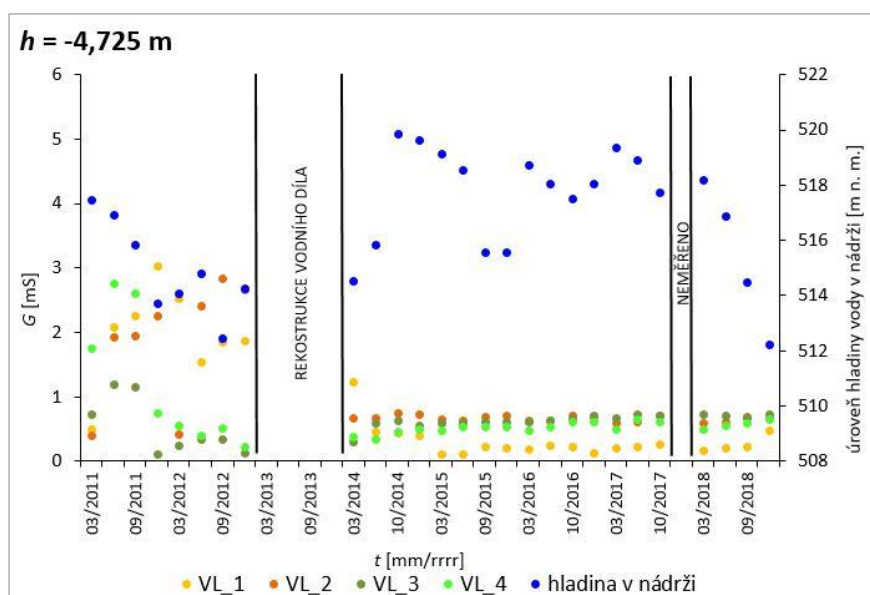
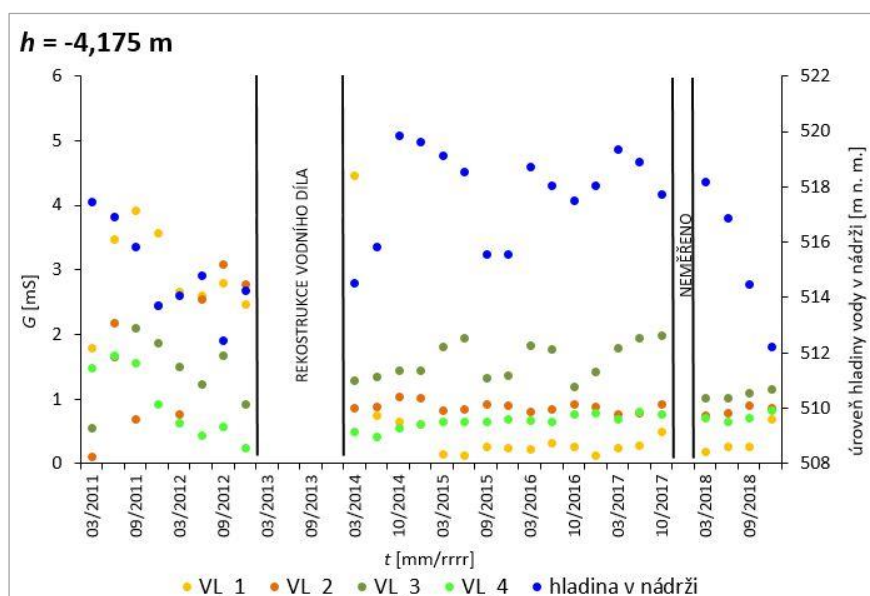
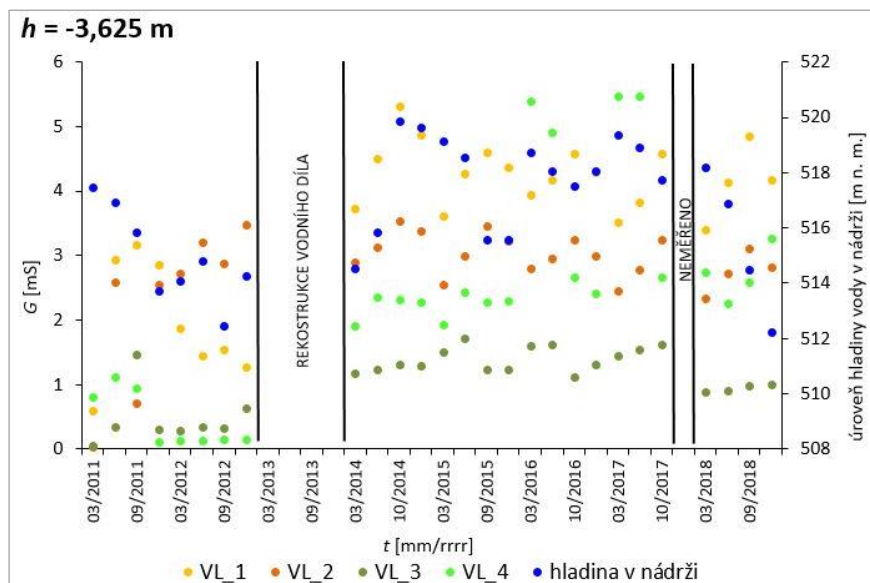
## Příloha 4 Grafy porovnání průběhů elektrické vodivosti a úrovně hladiny v nádrži



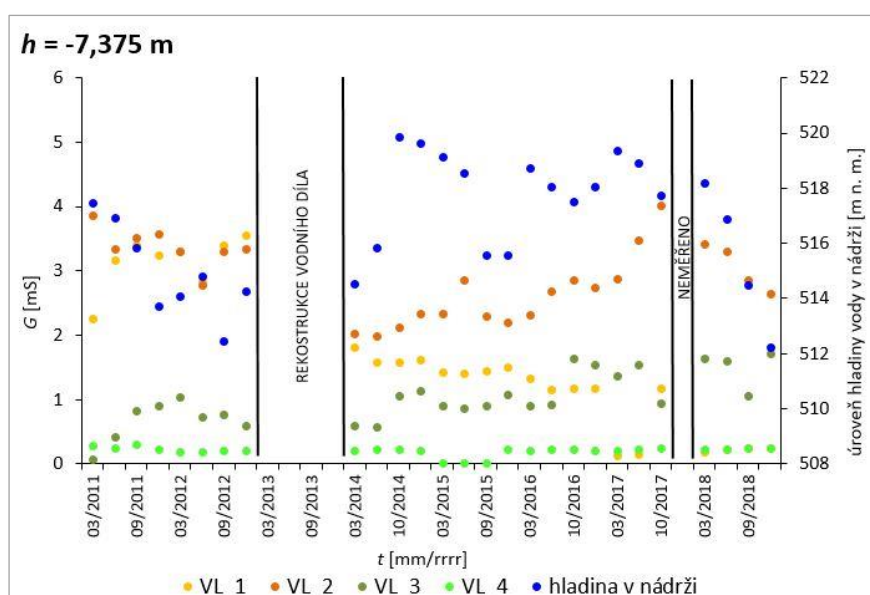
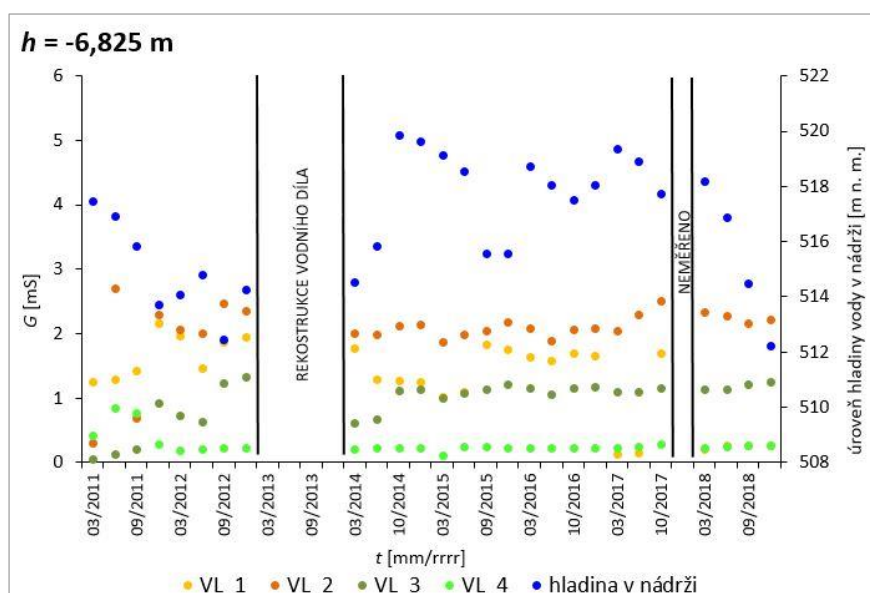
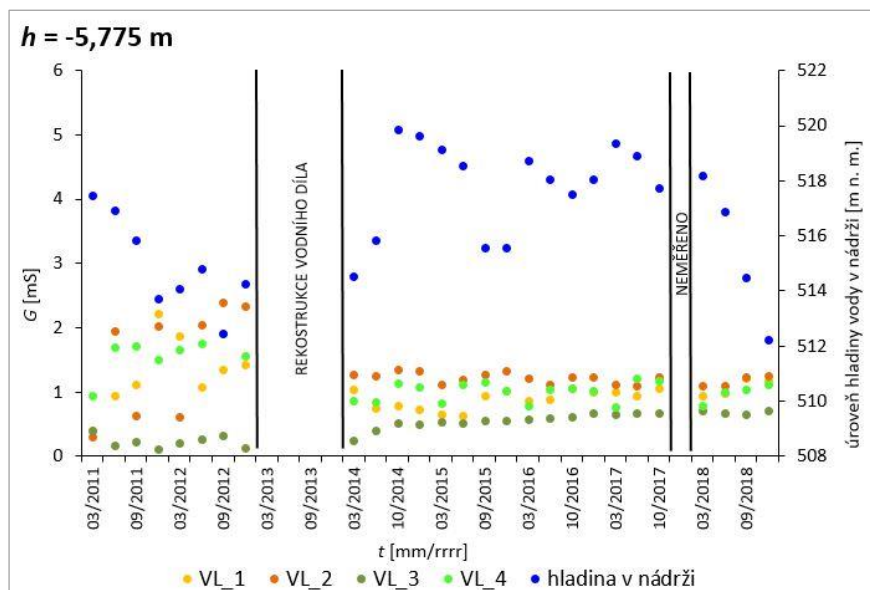
## Příloha 5 Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a úrovně hladiny v jednotlivých hloubkách

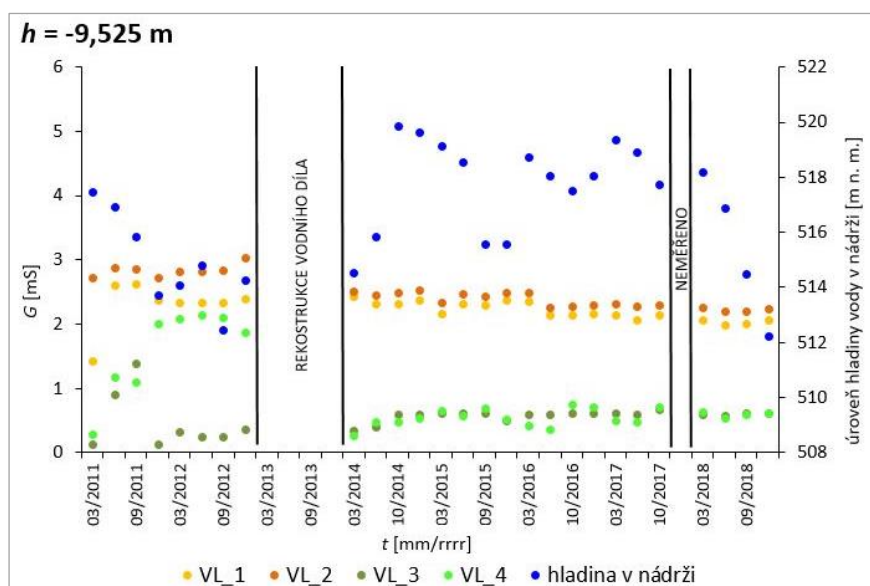
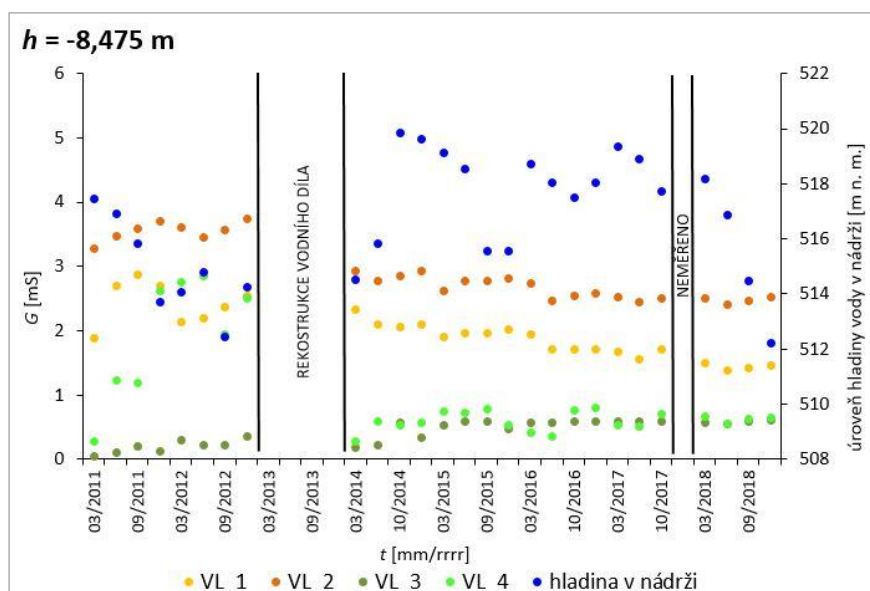
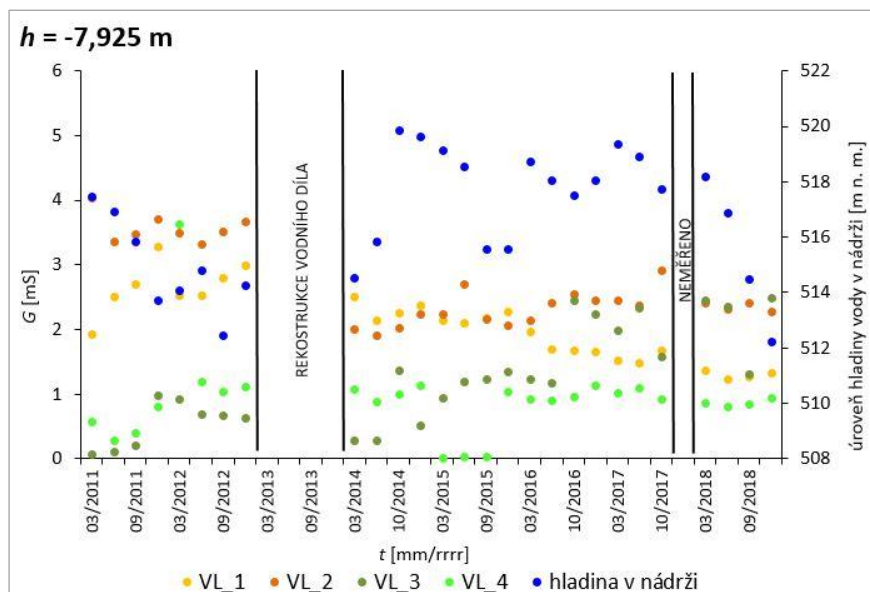


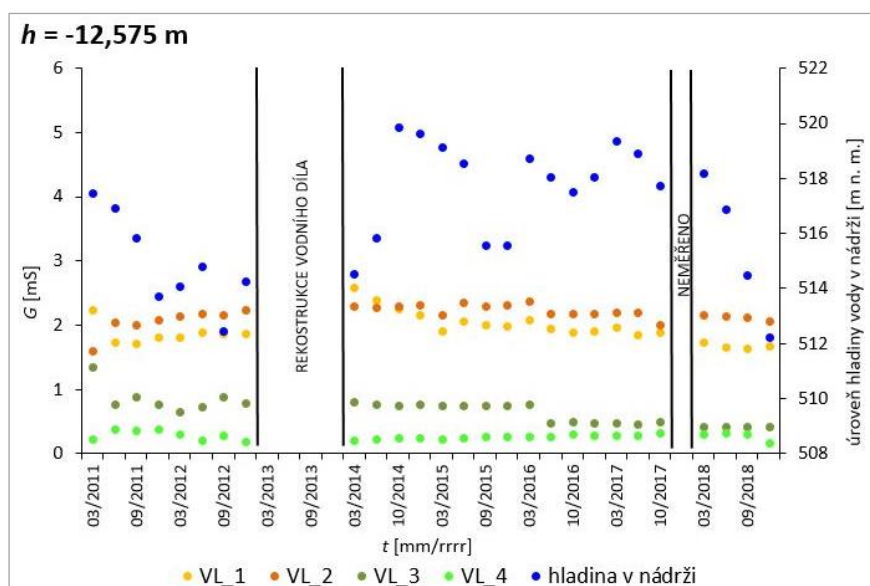
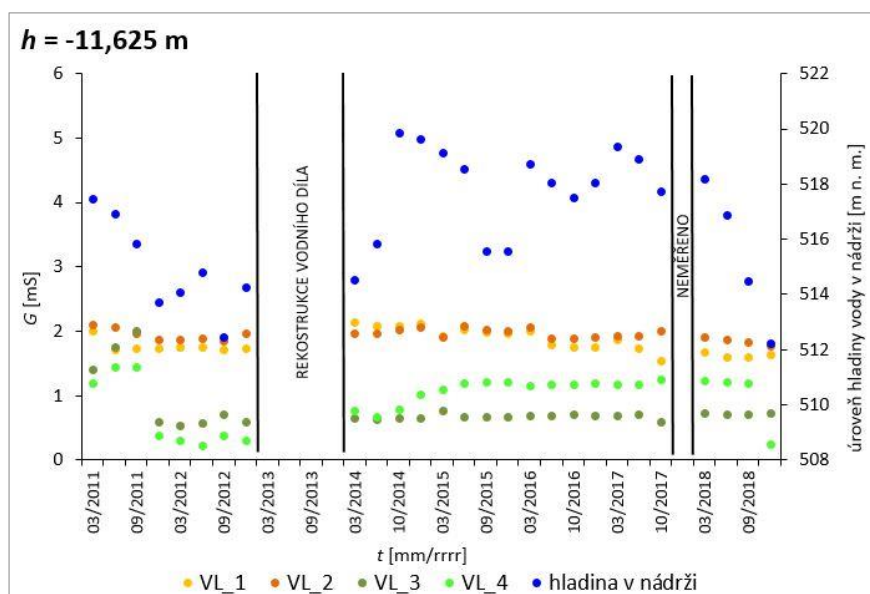
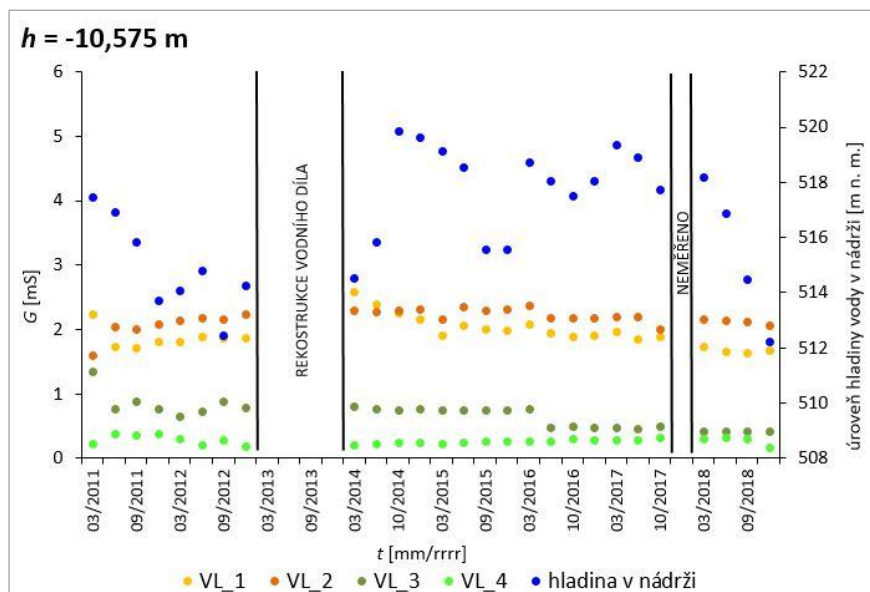


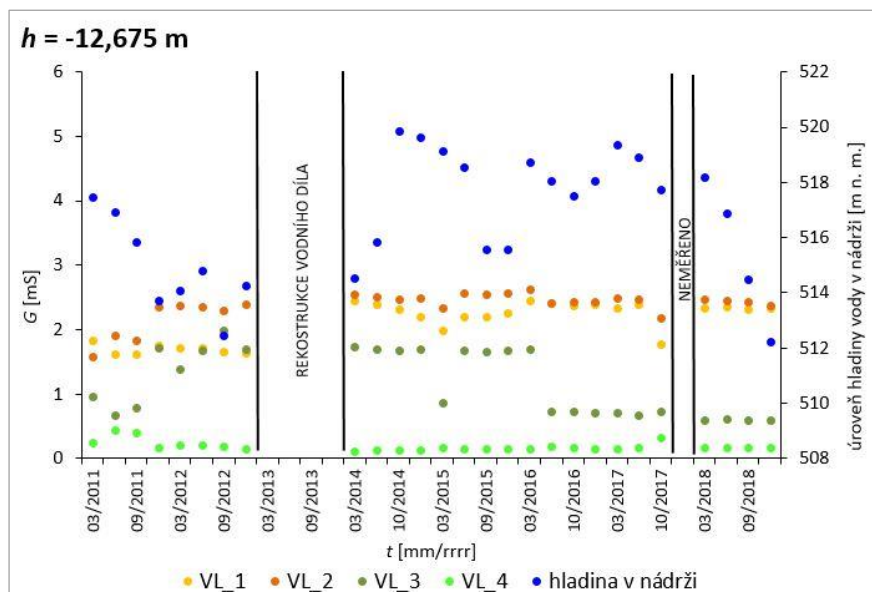




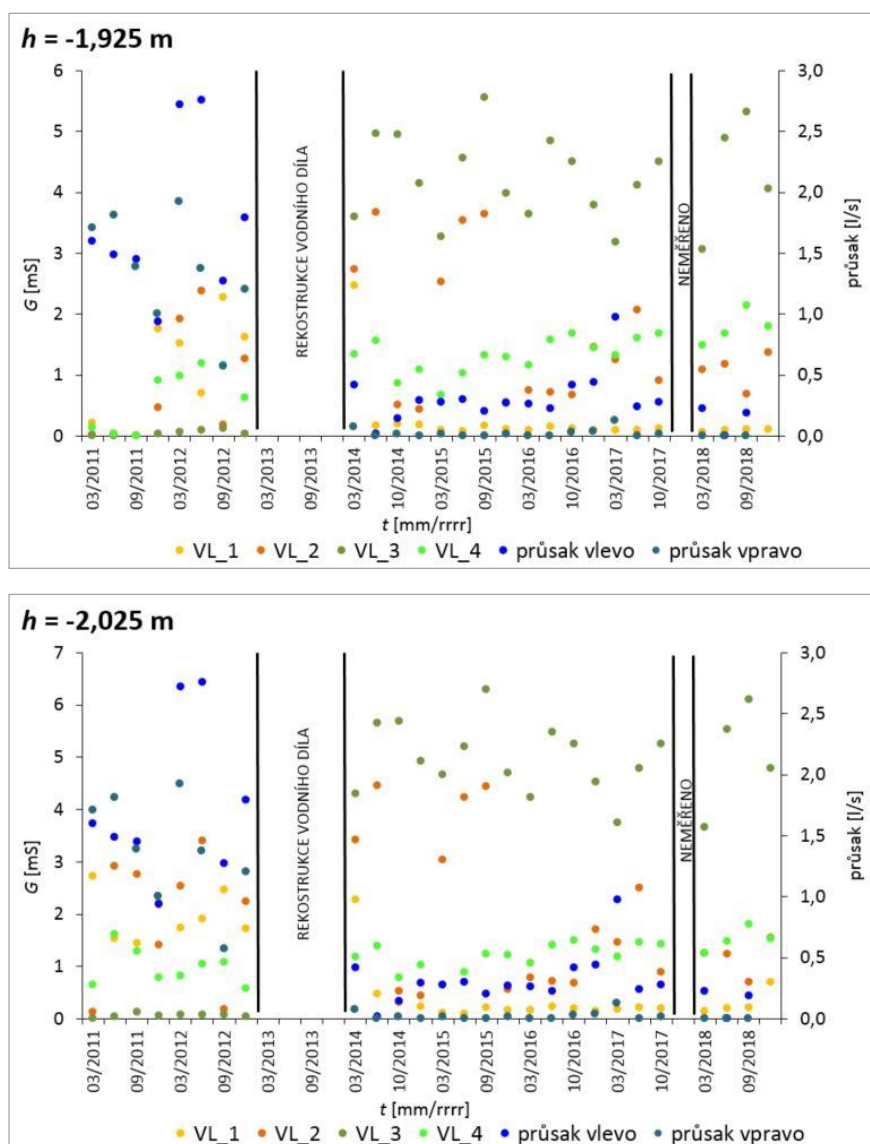




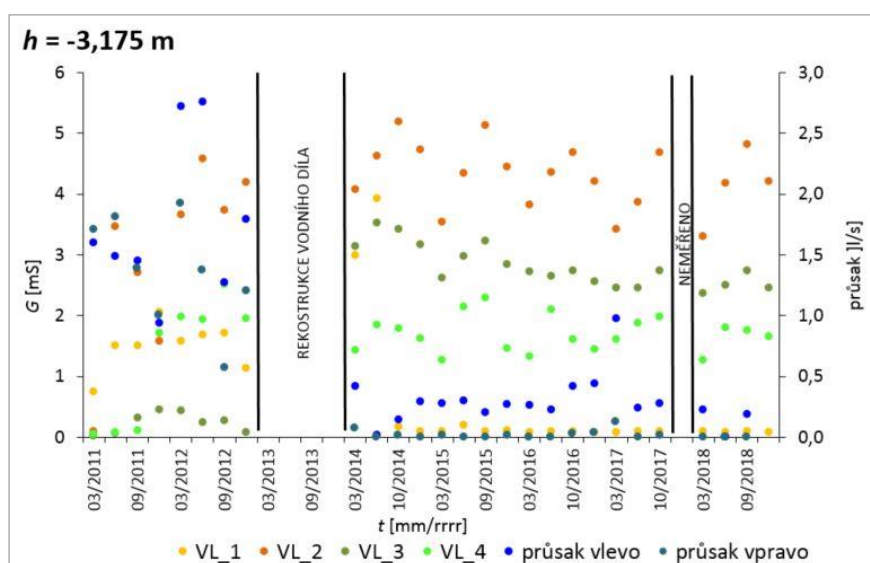
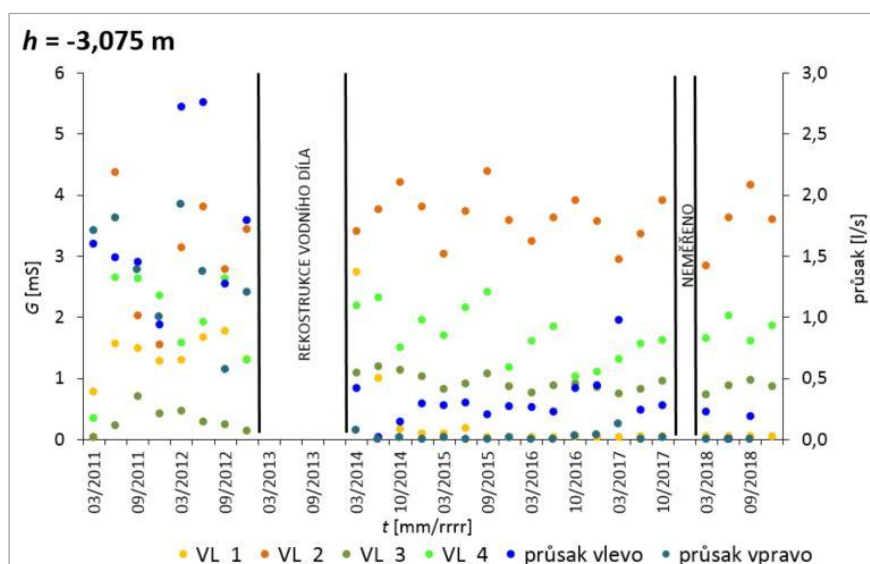
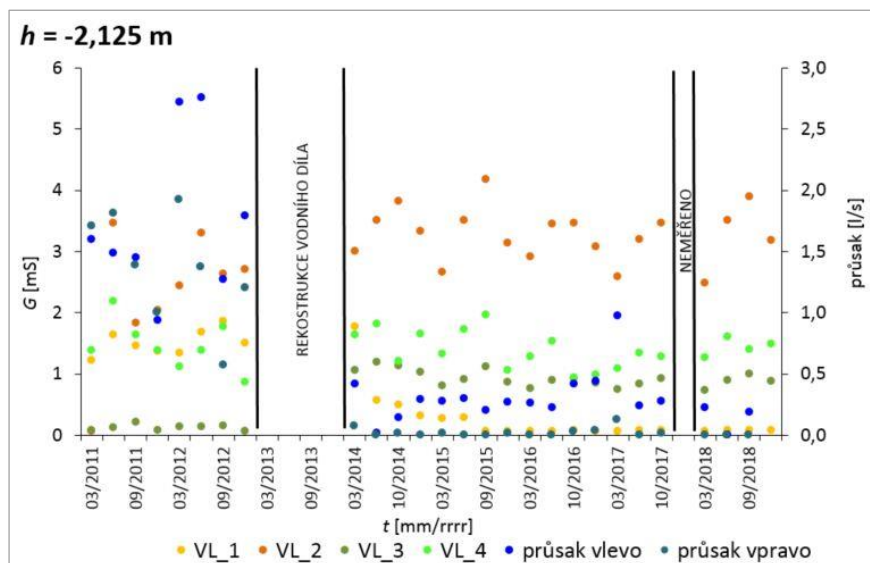


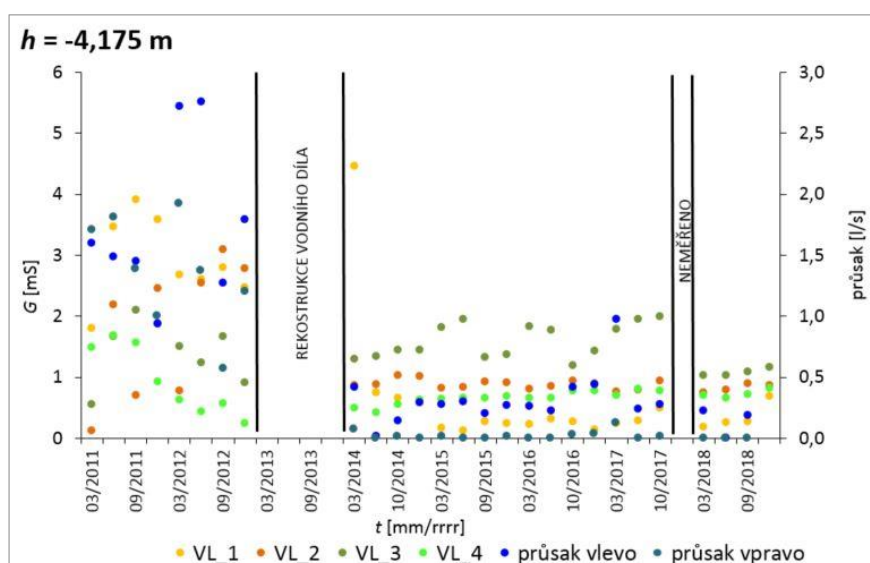
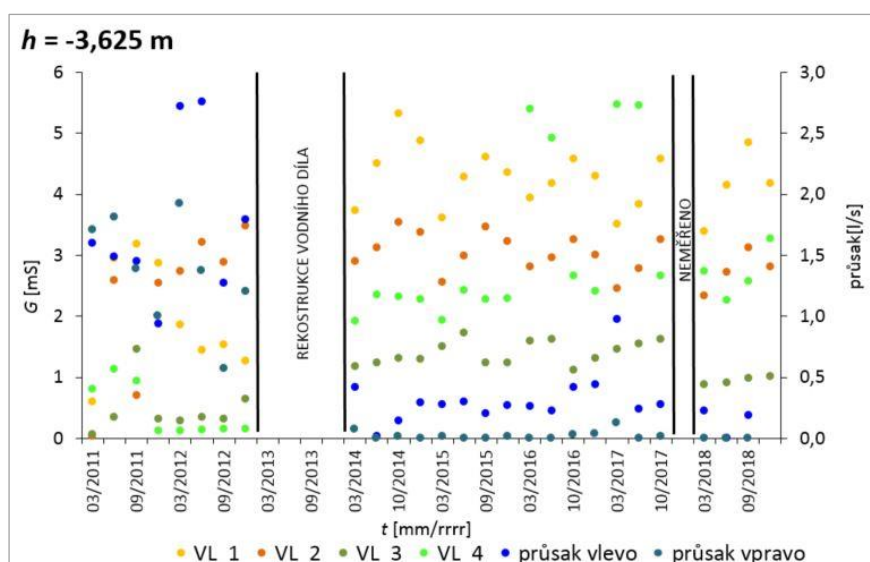
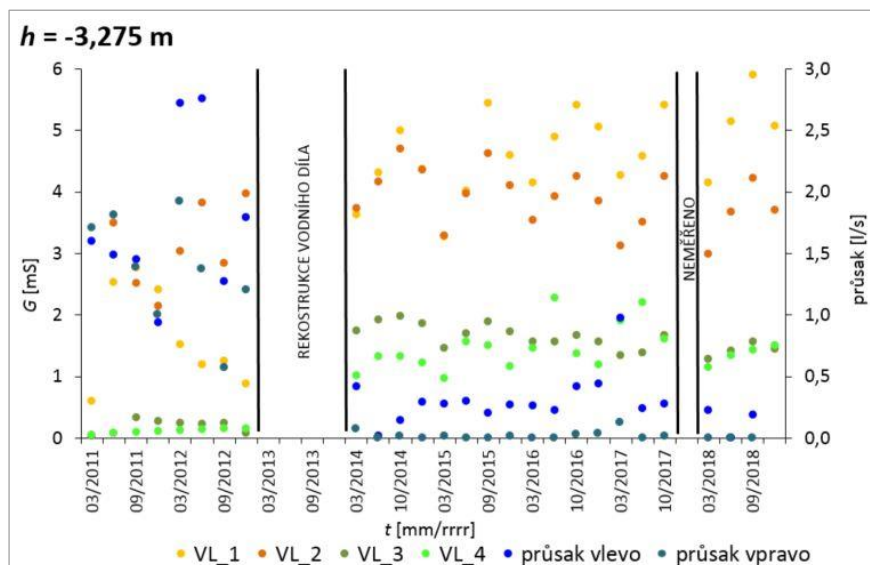


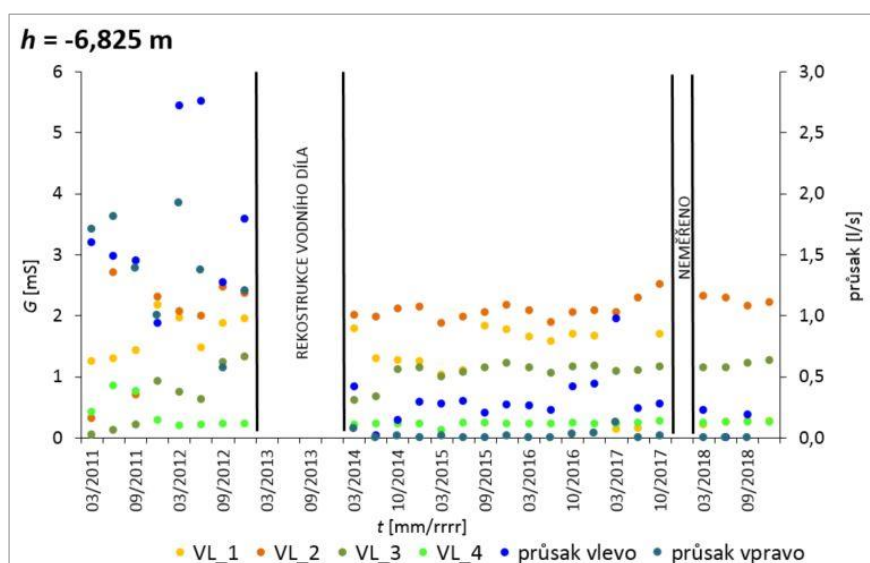
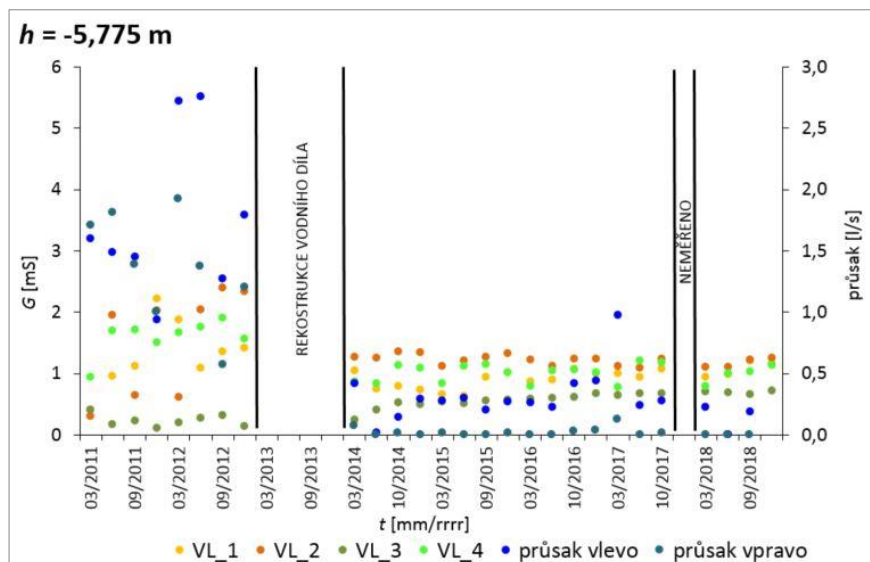
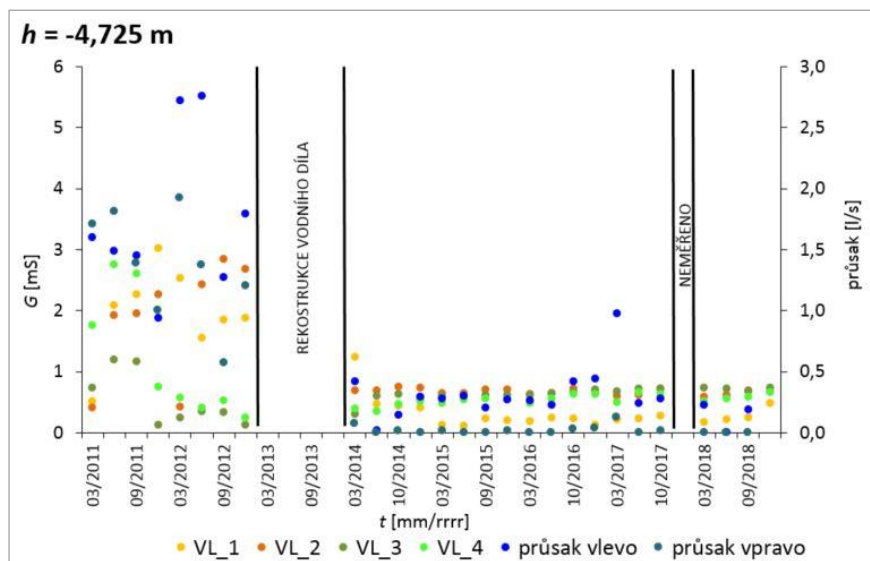
## Příloha 6 Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a průsaků v patě hráze



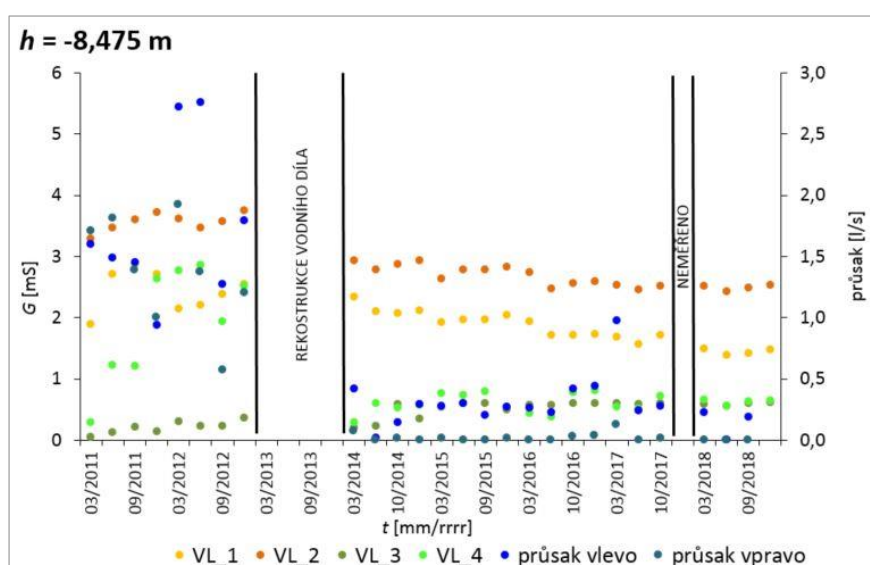
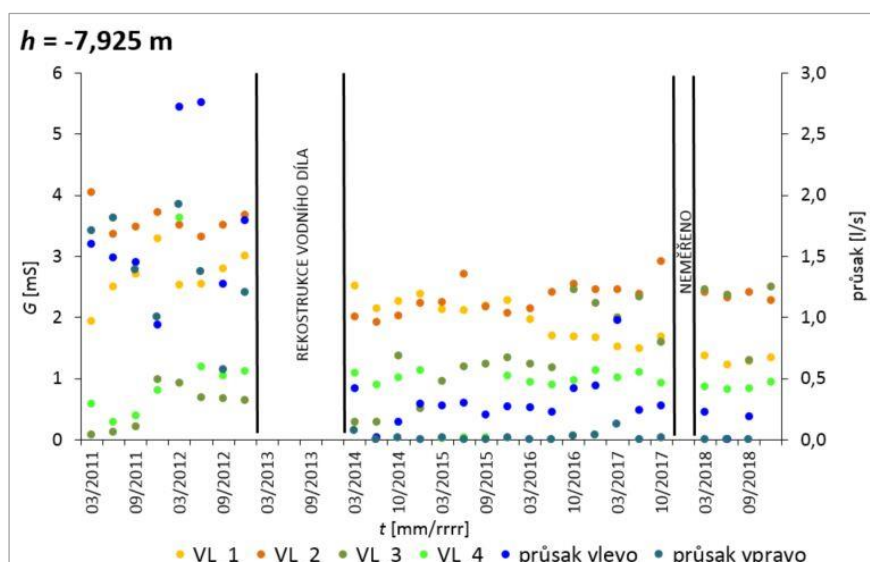
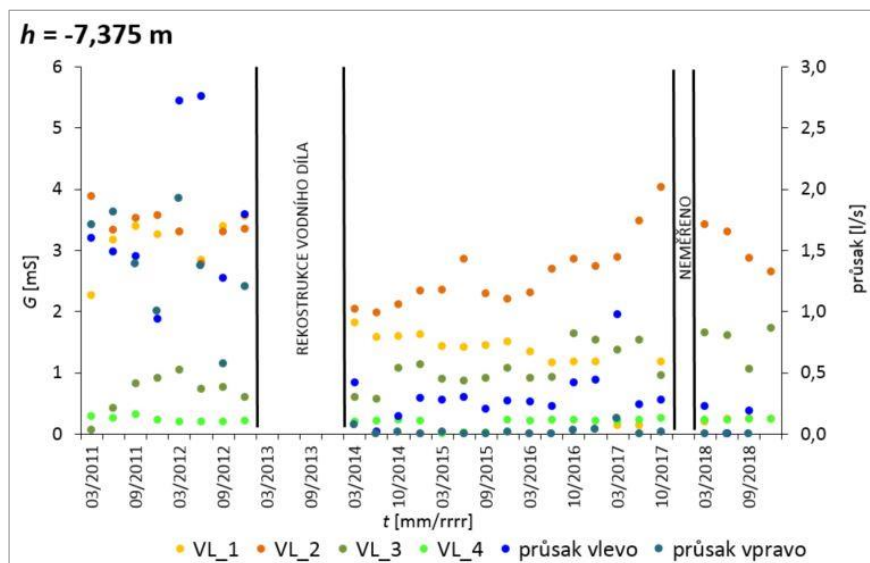


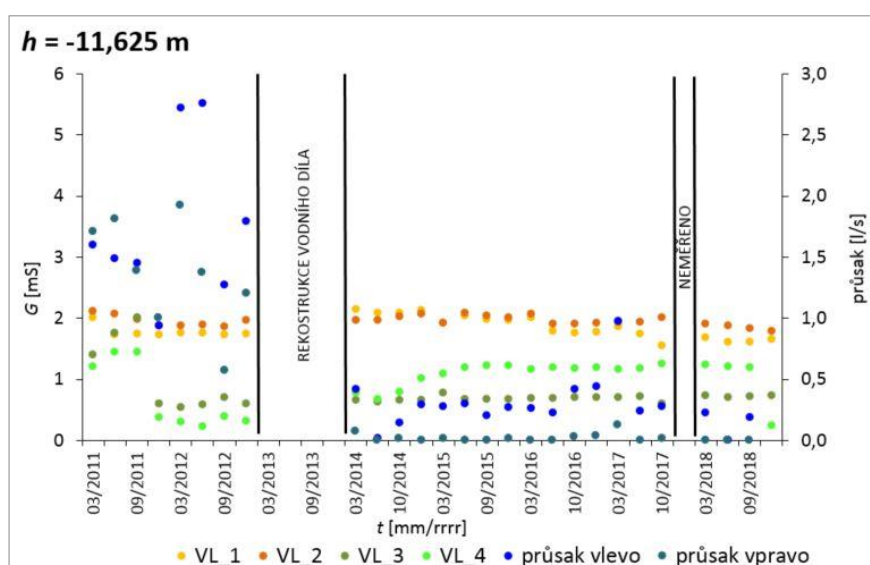
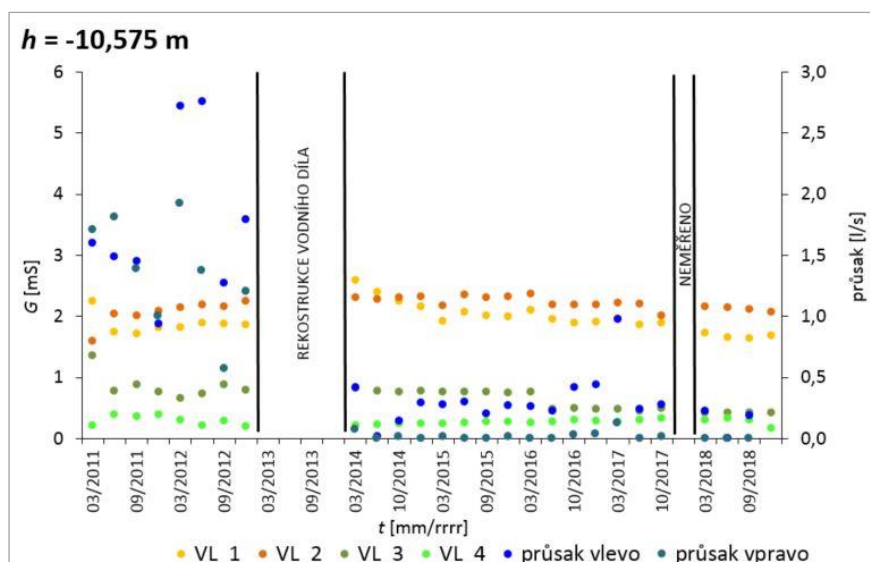
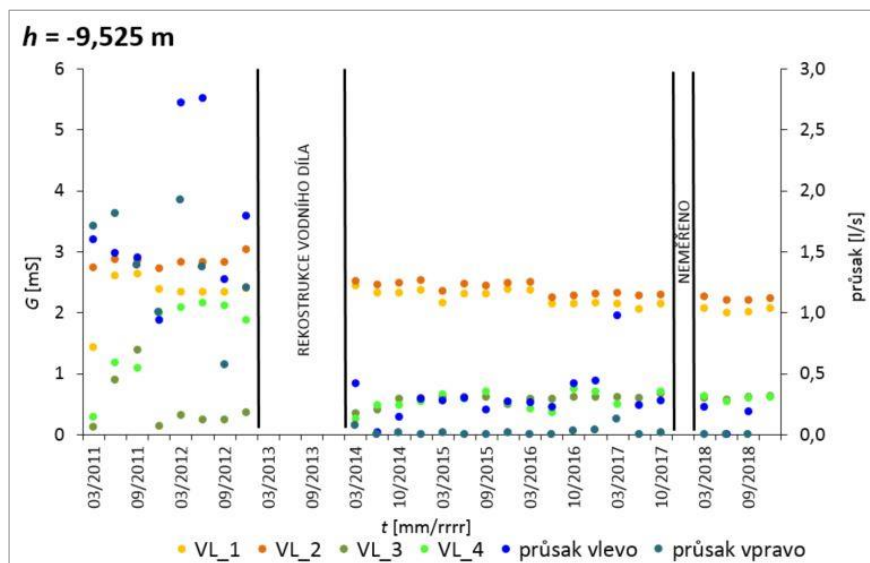


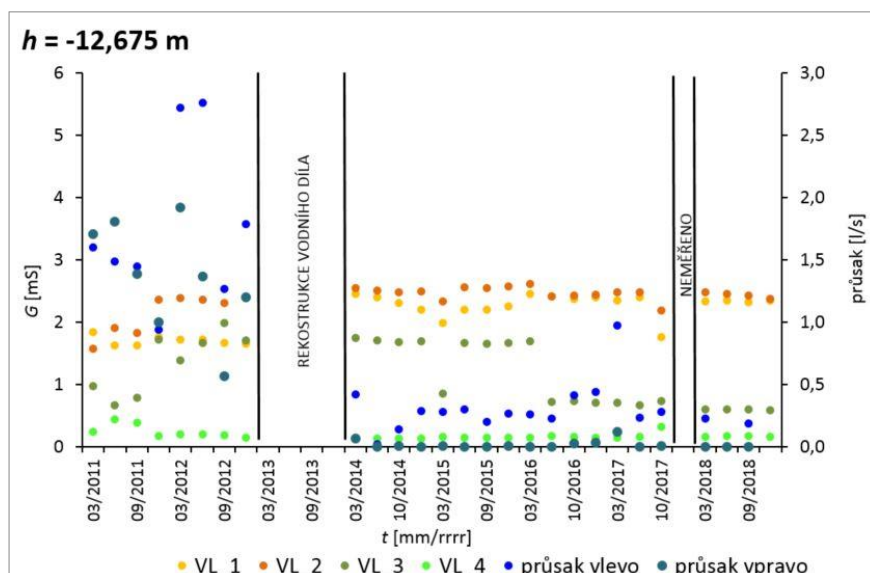
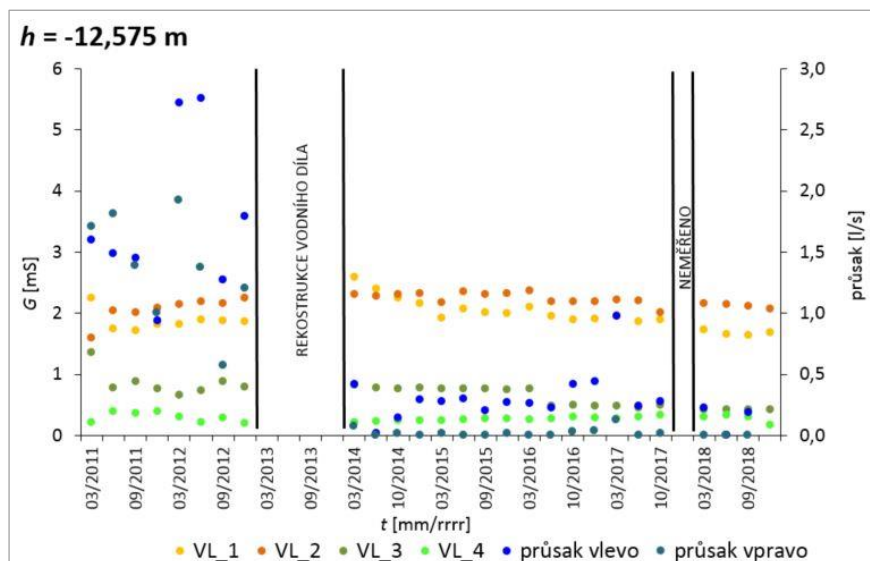












## Příloha 7 Grafy časového průběhu elektrické vodivosti a průsaků na dolní bermě

